

ZWEI - PUNKT - VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER
SCHRÄGEN NORMSICHT

Christian Werner

1902

ZWEI - PUNKT - VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER
SCHRÄGEN NORMSICHT

Dissertation
der Fakultät für Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Christian Werner
aus Zwickau/Sa.

München, 3. Februar 1981



1. Gutachter: Prof. Dr. H. Walther

2. Gutachter: Prof. Dr. W. Waidelich

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Februar 1982



Christoph & Michael
HOFBAUER
drucken + binden
Adalbertstrasse 18
8000 München 40

Zusammenfassung

Die Luftfahrt leidet regelmäßig und insbesondere im Herbst darunter, daß Nebel an den Flughäfen die Starts und Landungen erschwert oder unmöglich macht. In dieser Situation ist es besonders wichtig, die längs der Start- und Landewege herrschenden Sichtverhältnisse objektiv zu erfassen und die Tendenz der Verringerung zu ermitteln.

Für die Bestimmung der schrägen Normsicht könnte man im Prinzip Meßstrecken für die Transmission entlang des Gleitpfades erstellen. Die dabei notwendig werdenden Türme im Anflugbereich stellen aber in jedem Falle Gefahrenquellen dar. Der Einsatz von Laser-Fernmeßgeräten nach dem Radar Prinzip läßt hier Abhilfe erwarten. Bei diesem Radar ähnlichen Verfahren, wo anstelle von Radiowellen Laserstrahlung Verwendung findet (deshalb kurz Lidar genannt), wird die Rückstreuung des Lichts als Funktion der Zeit gemessen. Das zurückgestreute Licht enthält die Information über die Dichte der Aerosole bzw. Wassertröpfchen entlang des Laserstrahls. Setzt man vereinfachend eine streckenweise homogene Atmosphäre voraus, was mit einer konstanten Rückstreuung auf den entsprechenden Strecken verbunden wäre, ist die Größe des Rückstreusignals abhängig vom Produkt aus reziproker Entfernung im Quadrat und der Extinktion der Atmosphäre (für den Hin- und Rückweg des Laserlichts).

Wegen der bekannten Beziehung von Sichtweite und Extinktion kann die Sichtweite entlang des Laserstrahls durch exakte Analyse des Lidar Signals erhalten werden. Der Vorteil dieser Meßtechnik liegt darin, daß die Meßrichtung beliebig gewählt werden kann.

Die bisher genaueste Auswertemethode für das Rückstreusignal, die sogenannte Slope-Methode, erfordert einen großen elektronischen Aufwand für die Signalspeicherung und im Anschluß daran für die rechnerische Bestimmung der Entfernungsabhängigkeit der Dichte der streuenden Teilchen. Die praktische Einführung der Methode scheiterte bisher an den notwendigen Personal- und Gerätekosten. Ein weiteres Verfahren, welches apparativ einfacher und billiger ist, wird nur mit einer zusätzlichen Sichtmessung eindeutig. Diese Methode, die Reichweitenmethode genannt wird, benutzt die Nachweisgrenze des rückgestreuten Laserlichts als zusätzliche Information. Nachteilig ist, daß die Entfernung, aus der kein rückgestreutes Licht mehr nachgewiesen werden kann, bei guter Sicht, also bei geringem Aerosolgehalt und damit bei geringer Rückstreuung, gleich sein kann der Reichweite des Signals bei Nebel, wobei im letzteren Fall in erster Linie die stärkere Extinktion das Signal bestimmt. Deshalb kann eine sichere Aussage nur durch eine weitere, unabhängige Messung der Sicht erfolgen.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Mehrdeutigkeit der Reichweitenmethode zu beheben und trotzdem praktikabel zu bleiben. Dazu wird ein zweiter Stützpunkt des Lidar Signals benötigt. Dieser zusätzliche Meßwert muß eine Aussage über die Größe der Rückstreuung in unmittelbarer Nähe des Empfängers erbringen. Der elektronische Aufwand der Speicherung eines Spannungswertes und dessen Verrechnung mit der Reichweite des Signals ist gering im Vergleich zur aufwendigen Slope-Methode. Der mögliche verbleibende Nachteil, daß Inhomogenitäten im Signalverlauf zwischen 1. und 2. Stützstelle zu Fehlinterpretationen führen können, wird in der vorliegenden Arbeit durch die Messung unter einem weiteren Winkel ausgeschaltet. Ein Algorithmus für den praktischen Einsatz in Verbindung mit einem Laser-Wolkenhöhenmesser wird angegeben.

Für die Messung der schrägen Normsichtweite wurde ein Lidar-Gerät entwickelt und im praktischen Einsatz erprobt. Das Gerät ist gekennzeichnet durch einen einfachen, wartungsfreundlichen und kompakten Aufbau und läßt einen automatischen Betrieb zu.

Das Verfahren wurde bei Meßkampagnen getestet, wobei das neue Verfahren speziell im Vergleich zur Slope-Methode untersucht wurde. In den Fällen, in denen die Slope-Methode exakte Ergebnisse liefert, tut dies auch das 2-Punkt-Verfahren. Die Messungen haben ergeben, daß das Verfahren geeignet ist, die schräge Normsicht direkt zu bestimmen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
2 Überblick über herkömmliche Methoden zur Bestimmung der schrägen Normsicht und theoretische Grundlagen der Methoden	10
2.1 Definition der Begriffe Sichtweite, Normsicht und schräge Normsicht	10
2.2 In der Praxis geforderte Parameter	14
2.3 Lidar Methode	17
2.4 Auswertung der Lidar Signale	23
2.4.1 Allgemeine Grundlagen	23
2.4.2 Slope Methode	26
2.4.3 Reichweitenmethode	31
3 Theoretische Grundlagen des Zwei-Punkt-Verfahrens	34
3.1 Grundlagen bei homogenen Sichtbedingungen	34
3.2 Prinzip bei stückweise homogener Schichtung	36
3.3 Prinzip bei inhomogener Schichtung	42
3.4 Allgemeines Rechenprogramm mit Analyse möglicher Schichtungen	43
4 Experimenteller Aufbau	52
4.1 Lidar System	52
4.1.1 Laser	54
4.1.2 Empfängerteleskop	56
4.1.3 Photoelektrischer Nachweis	60
4.1.4 Mechanischer Aufbau des Systems	61
4.2 Datenerfassungssystem	63
4.2.1 Lidar Datenerfassung	63
4.2.2 Datenerfassung für das Zwei-Punkt-Verfahren	64
4.3 Signalrauschen	66
4.4 Logarithmischer Verstärker	67
4.5 Bestimmung der Signalcharakteristik	68
4.5.1 Bestimmung mittels Slope Methode	68
4.5.2 Bestimmung mittels Zwei-Punkt-Verfahren	69
4.6 Fehlerbetrachtung	70

5	Experimentelle Erprobung	72
5.1	Meßbeispiel bei homogener Schichtung	72
5.2	Ergebnisse einer Meßkampagne	74
5.2.1	Beispiel einer homogenen geschichteten Atmosphäre	74
5.2.2	Beispiel einer Inhomogenität	76
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Meßkampagne	78
5.3	Meßbeispiel bei Inversionslage	80
6	Zusammenfassung und Ausblick	85
7	Schrifttum	87

Bei der ständig zunehmenden Verkehrsdichte im Flugverkehr und den immer größer werdenden Geschwindigkeiten ist es von wesentlicher Bedeutung, die bei der Landung und beim Start der Flugzeuge herrschenden Sichtverhältnisse objektiv erfassen zu können. Auch im Straßenverkehr spielen die jeweiligen Sichtverhältnisse eine große Rolle. Ein Beispiel hierfür ist die Nebelwarnung auf der Autobahn. Hierzu werden an Stellen, an denen sich bekanntermaßen leicht Nebel bildet, Sichtmeßgeräte fest installiert, die den Verkehrsfluß abhängig von der Sichtweite steuern können.

Die Luftfahrt leidet regelmäßig und insbesondere im Herbst darunter, daß Nebel an den Flughäfen die Starts und Landungen erschwert oder unmöglich macht [47]. In dieser Situation ist es besonders wichtig, die längs der Start- und Landewege herrschenden Sichtverhältnisse und deren Tendenz messen zu können [20]. Technische Hilfsmittel für die Messung sind bisher üblicherweise Transmissometer und Leuchtdichtemeßgeräte am Boden, mit deren Hilfe die sogenannte Runway Visual Range (RVR) ermittelt wird [1,22]. Zusätzlich und für den Piloten wesentlich ist jedoch auch der Sichtverlauf längs des Gleitpfades, die sogenannte Slant Visual Range (SVR) [50], die eigentlich stets ebenfalls gemessen werden müßte (Definition der Sichtweite s. Kap. 2.1).

Abb. 1 verdeutlicht die geometrischen Verhältnisse beim Landeanflug. Bei der Diskussion nehmen wir an, daß ein im Anflug auf dem Gleitpfad befindliches Flugzeug nacheinander die Horizontalsichtstufen mit den Sichtweiten V_{N_0} , V_{N_1} und V_{N_2} durchfliegt.

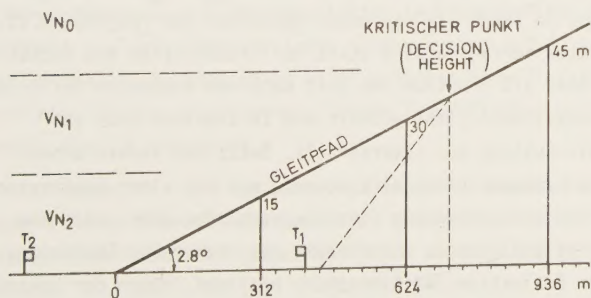


Abbildung 1: Bedingungen beim Landeanflug

Vom Flughafen aus kann dem Piloten nur die horizontale Normsichtweite V_{N_2} über der Landebahn gemeldet werden, die mit einem Transmissometer zwischen den Punkten T_1 und T_2 gemessen wird. Für den Piloten, der verantwortlich für die sichere Landung ist, wäre es wichtiger, die Sicht entlang des Gleitpfades zu kennen. Bei einem Anflug durch Wolken (z.B. $V_{N_1} < V_{N_0}$ und $V_{N_1} < V_{N_2}$) ist die Höhe der Wolkenuntergrenze und die Dicke dieser Wolkenschicht interessant. Die Bestimmung der Wolkenuntergrenze wird mit Ceilometern oder Wolkenhöhenmessern durchgeführt [22].

Für den Fall des Bodennebels ($V_{N_2} < V_{N_1}$, V_{N_0}) muß wiederum die Höhe der Nebelobergrenze und die optische Homogenität bekannt sein, und in derartigen Situationen ist es für die Verantwortlichen außerordentlich schwierig, anhand von Zusatzinformationen, z.B. aus Ballonaufstiegen und einschlägiger Erfahrung, eine präzise Auskunft darüber zu geben, ob der anfliegende Pilot am kritischen Punkt (Abb. 1) mit Landebahnsicht rechnen kann, ob er eventuell auf ein Fehlanflugverfahren gefaßt sein muß oder ob die Sichtverhältnisse eine sichere Landung zulassen oder nicht. In derart kritischen Wittersituationen, die leider nicht selten sind, wäre eine laufende instrumentelle Überwachung der Schrägsichtweite von großem Vorteil [64].

Für die Bestimmung der schrägen Normsicht könnte man im Prinzip Transmissometerstrecken auf dem Gleitpfad erstellen [60]. Die dabei notwendig werdenden Türme im Anflugbereich stellen aber in jedem Falle Gefahrenquellen dar. Der Einsatz von Fernmeßgeräten und insbesondere der Lidargeräte läßt hier Abhilfe erwarten. Lidar bedeutet light detection and ranging in Analogie zu Radar als radiowave detection and ranging [7,13,36,49,62]. Bei diesem Verfahren wird statt der Transmission die Rückstreuung eines Laserpulses als Funktion der Zeit nach dem Aussenden des Pulses gemessen. Das rückgestreute Licht enthält die Information über die Dichte der Aerosole entlang des Laserstrahls. Setzt man vereinfachend eine streckenweise homogene Atmosphäre voraus, was mit einer konstanten Rückstreuung auf den entsprechenden Strecken verbunden wäre, wird die Größe des Rückstreusignals durch das Produkt aus reziproker Entfernung im Quadrat und der Extinktion der Atmosphäre bestimmt. Wegen der bekannten Beziehung von Sichtweite und Extinktion kann dann im Prinzip die Sichtweite entlang des Laserstrahls durch exakte Analyse des Lidar Signals erhalten werden.

Der Vorteil der Lidartechnik liegt darin, daß die Meßrichtung leicht geändert werden kann, so könnte insbesondere auch entlang der in Abb. 1 gestrichelten Linie (SVR) gemessen werden.

Die bisher genaueste Auswertemethode für das Rückstreuungssignal, die sogenannte Slope-Methode, erfordert einen großen elektronischen Aufwand für die Signalspeicherung und für die rechnerische Bestimmung der Entfernungsabhängigkeit der Dichte der streuenden Teilchen [13,62]. Die praktische Einführung der Methode scheiterte bisher an den notwendigen Personal- und Gerätekosten [44,55].

Ein weiteres Verfahren, welches die Kostenprobleme löst, ist nur mit einer zusätzlichen unabhängigen Sichtmessung eindeutig [78]. Diese Methode, die Reichweitenmethode genannt wird, benutzt das Erreichen der Nachweisgrenze für das rückgestreute Laserlicht als zusätzliche Information. Dieses Verfahren hat jedoch den entscheidenden Nachteil, daß die Entfernung, bei der die Nachweisgrenze bei guter Sicht erreicht wird, d.h. bei geringem Aerosolgehalt und damit bei geringer Rückstreuung, übereinstimmen kann mit der Reichweite, die bei Nebel gemessen wird und wo das Signal aufgrund der stärkeren Extinktion sehr schnell abnimmt. Deshalb kann eine eindeutige Aussage nur durch eine weitere unabhängige Messung der Sichtweite erfolgen.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Mehrdeutigkeit der Reichweitenmethode auf praktikable Weise zu beheben. Dazu wird ein zweiter Stützpunkt des Lidar Signals benötigt. Dieser zusätzliche Meßwert wird aus der Rückstreuung in unmittelbarer Nähe des Empfängers ermittelt. Der elektronische Aufwand der Speicherung eines Spannungswertes und dessen Verrechnung mit der Reichweite des Signals ist gering im Vergleich zur aufwendigen Slope-Methode. Der mögliche verbleibende Nachteil, daß Inhomogenitäten im Signalverlauf zwischen 1. und 2. Stützpunkt zu Fehlinterpretationen führen können, wird in der vorliegenden Arbeit durch die Messung unter einem weiteren Winkel ausgeschaltet. Ein Algorithmus für den praktischen Einsatz in Verbindung mit einem Laser-Wolkenhöhenmesser wird angegeben.

Für die Messung der Schrägsicht wurde ein Lidar-Gerät entwickelt und im praktischen Einsatz erprobt. Das Gerät ist gekennzeichnet durch einen einfachen, wartungsfreundlichen und kompakten Aufbau und läßt einen automatischen Betrieb zu.

Das neue Verfahren ist bei Feldmessungen getestet worden.

2 Überblick über herkömmliche Methoden zur Bestimmung der schrägen Normsicht und theoretische Grundlagen der Methoden

2.1 Definition der Begriffe Sichtweite, Normsicht und schräge Normsicht

Der Begriff Sichtweite in der Atmosphäre ist mit der maximalen Entfernung verknüpft, über die eine bestimmte Sichtaufgabe erfüllbar ist. Eine Festlegung erfolgt aufgrund einer einheitlichen Theorie für den Wellenlängenbereich von $0.35 \mu\text{m}$ bis $3 \mu\text{m}$. [19,31,37,56]

Mittels Koschmieders Sichttheorie [42] ist es unter gewissen Annahmen möglich, eine Aussage über die Sichtweite zu machen, wenn die Extinktion der Atmosphäre bekannt ist. Für nicht selbst leuchtende und nicht reflektierende Objekte geht die Theorie davon aus, daß der Sehkegel durch das Tageslicht aufgehellt wird und dadurch das Ziel heller erscheint, als es in Wirklichkeit ist. Vom Beobachter aus ist das Ziel nicht mehr zu sehen, wenn die scheinbare Leuchtdichte des Zieles B_Z um einen Betrag c größer ist als die Leuchtdichte des Hintergrundes B_H

$$B_Z = (1 + c) B_H \quad (1)$$

c wird der Kontrast natürlicher Sichtziele genannt. Um einen von der Hintergrundleuchtdichte unabhängigen Wert zu erhalten, definiert man mit c_0 den sogenannten Nahkontrast. Einige Beispiele hierfür sind:

Laubwald in diffusem Licht	$c_0 = -0.949 \pm 0.016$
Nadelwald in diffusem Licht	$c_0 = -0.977 \pm 0.021$

Nach Koschmieder wird damit

$$V_H = -\frac{1}{\sigma_e} \ln \frac{c_0}{c} \quad (2)$$

mit V_H = Horizontalsichtweite,
 σ_e = Extinktionskoeffizient

Um für die praktische Anwendung zu objektunabhängigen, meßtechnisch erfaßbaren Werten zu kommen, bezieht man sich einmal auf dunkle, nicht reflektierende Objekte mit $c_0 = -1$. Außerdem wird ein unterer Kontrastschwellwert ϵ definiert mit $c = \epsilon = 0.02$.

Dieser Kontrastschwellwert ϵ stellt am Tage für Objekte, die einen Sehwinkel größer 20' aufspannen, einen Durchschnittswert dar. Zusätzlich wird die Wellenlänge $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ zur Bestimmung der Normsicht vorausgesetzt, die Wellenlänge der Maximalempfindlichkeit des menschlichen Auges. Mit diesen Definitionen wird aus der Horizontal[sichtweite V_H die sogenannte Normsichtweite V_N , die in der englischsprachigen Literatur auch "meteorological visibility" genannt wird.

$$V_N = \frac{1}{\sigma_e} \ln (1/0,02) = 3,912/\sigma_e \quad (3)$$

Diese Beziehung (3) hat sich als sehr praktisch erwiesen und wurde in der natürlichen Atmosphäre vielfach experimentell nachgeprüft [57].

Die Normsichtweite V_N entspricht mit dieser Definition der Laufstrecke, die bei der Wellenlänge $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ 2 % der einfallenden Strahlung gerichtet hindurchläßt; dies unter der Voraussetzung, daß die Extinktion längs dieser Laufstrecke konstant ist [19,64].

Der Hauptgrund für die Kontrastminderung ist auf die Streuung der Luft zwischen Objekt und Beobachter zurückzuführen. Im infraroten Spektralbereich ist für $\lambda > 3 \mu\text{m}$ die thermische Emission der Atmosphäre zu berücksichtigen.

Die Voraussetzungen für die Koschmiedersche Beziehung für die Normsichtweite sind zusammengefaßt:

- a) Gleiche Beleuchtungsverhältnisse auf der Strecke Beobachter-Ziel-Horizont,
- b) Extinktion auf der gesamten Strecke ist konstant,
- c) Ziel ist schwarz,
- d) der Kontrastschwellwert für das Auge ist 0,02.

Die Normsichtweite wird mit Transmissometern bestimmt, die bei der Wellenlänge $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ ihr Empfindlichkeitsmaximum haben. Man mißt mit diesen Geräten den Grad der gerichteten Transmission τ_r längs einer Laufstrecke R, die Meßbasis genannt wird

$$\tau_r = e^{-\sigma_e \cdot R} \quad : \quad \sigma_e = \frac{1}{R} \cdot \ln \frac{1}{\tau_r} \quad (4)$$

Mit Koschmieders Beziehung (3) erhält man daraus

$$V_N = \frac{3,912 \cdot R}{\ln \left(\frac{1}{\tau_r} \right)} \quad (5)$$

Die Runway Visual Range (RVR) oder Pistensicht ist die Entfernung in Start- oder Landerichtung, bis zu der der Pilot eines Flugzeuges, das sich auf der Mittellinie einer Landebahn befindet, die Markierung auf der Landebahn oder die sie begrenzenden Randfeuer noch erkennen kann. Sie wird aus den Transmissometermessungen der Normsicht in Verbindung mit Aussagen über die Adaptationsleuchtdichte und die Lichtstärke der Anflugbefehrerung ermittelt. Die Schrägsichtweite oder Slant Visual Range (SVR) ist definiert als die schräge Distanz zum entferntesten Landelicht, welches der Pilot aus der Höhe von 100 Fuß, der sogenannten Decision height, noch sieht (Abb. 1).

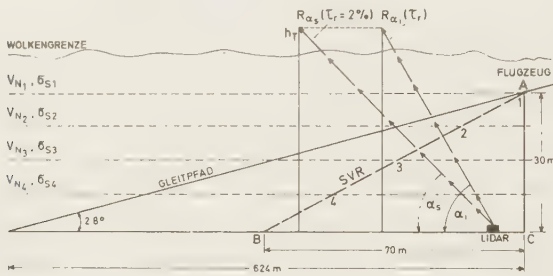


Abbildung 2: Meßanordnung für den Fall der streckenweise homogenen Schichtung in der Atmosphäre

In Analogie zur Definition der Normsichtweite V_N kann man eine schräge Normsichtweite V_{NS} folgendermaßen definieren (nach [58]):

Die schräge Normsichtweite $V_{NS}(\alpha)$ ergibt sich durch die Projektion des schrägen Sichtpfades $R(\alpha$ ist der Erhebungswinkel) für 2 % Strahltransmission auf den horizontalen Boden

$$V_{NS}(\alpha) = R_{\alpha_s}(\tau_r = 2\%) \cos \alpha_s \quad (6)$$

Abbildung 2 zeigt die Verhältnisse.

Bei einer Höhe h_T sei $h_T = R_{\alpha S} (\tau_r = 2 \%) \sin \alpha_S$. Bestimmt man die schräge Normsicht unter einem beliebigen Winkel α_i , so wird mit der geschichteten Verteilung des Extinktionskoeffizienten σ_e der Grad der gerichteten Transmission

$$\tau_{ri}(\alpha_i) = \exp \left\{ - \int_0^{R_{\alpha i}} \sigma_e(h, \alpha_i) dh \right\} \quad (7)$$

und mit $\sin \alpha_i = \frac{h_T}{R_{\alpha i}}$ wird daraus

$$\ln \frac{1}{\tau_{ri}(\alpha_i)} = \frac{1}{\sin \alpha_i} \int_0^h \sigma_e(h) dh \quad (8)$$

Für den Winkel α_S war analog

$$\ln \frac{1}{\tau_{rs}(\alpha_S)} = \frac{1}{\sin \alpha_S} \int_0^h \sigma_e(h) dh \quad (9)$$

Aus (8) und (9) folgt

$$\frac{\sin \alpha_S}{\sin \alpha_i} = \frac{\ln \frac{1}{\tau_{ri}(\alpha_i)}}{\ln \frac{1}{\tau_{rs}(\alpha_S)}} = \frac{\ln \frac{1}{\tau_{ri}(\alpha_i)}}{3,912} \quad (10)$$

Mit (6) wird $V_{NS} = h_T \cdot \operatorname{ctg} \alpha_S$. Mit (10) und der Umformung $\operatorname{ctg}^2 \alpha_S = \frac{1}{\sin^2 \alpha_S} - 1$

$$V_{NS} = h_T \sqrt{\left(\frac{3,912 \cdot R_{\alpha i}}{h_T \cdot \ln \frac{1}{\tau_{ri}(\alpha_i)}} \right)^2 - 1} \quad (11)$$

Dies bedeutet, daß bei Sichtbedingungen, die gerade 2 % Strahltransmission für die Sichtbarkeit erfordern, ein Beobachter alle Objekte am Boden sieht, die innerhalb eines Radius V_{NS} um den Fußpunkt liegen. Für einen Beobachter am Boden können anfliegende Objekte innerhalb eines Bereiches V_{NS} erfaßt werden; bei größerer Entfernung verschwinden die Objekte im Dunst.

Führt man analog zur Bestimmung der Normsichtweite V_N (Gl. (5)) eine Schrägsichtweite $V_S'(\alpha)$ ein, so wird für einen Winkel α_S :

$$V_S'(\alpha_S) = \frac{3,912 \cdot R_{\alpha S}}{\ln \frac{1}{\tau_{rs}(\alpha_S)}} \quad (12)$$

Durch Einsetzen von (12) in (11) wird

$$V_{NS} = h_T \sqrt{\frac{V_S'^2(\alpha_S)}{h_T^2} - 1} \quad \text{oder}$$

$$V_{NS} = \sqrt{V_S'^2(\alpha_S) - h_T^2} \quad (13)$$

Die Gleichung (13) gibt den in Abbildung 2 gezeigten Fall wieder, da man mit der Messung $V_S'(\alpha)$ ein Maß für R_α ($\tau_r = 2\%$) erhält.

Zur meßtechnischen Erfassung der schrägen Normsichtweite $V_{NS}(\alpha)$ wird man eine Schrägsichtweite $V_S'(\alpha)$ bestimmen und diese mit dem Kosinus des Meßwinkels multiplizieren. Die SVR kann aus dieser schrägen Normsicht in Analogie zur RVR durch Verbindung mit Aussagen über die Lichtstärke der Anflugbefeuerung und über das Luftlicht bestimmt werden.

2.2 In der Praxis geforderte Parameter

Die Bestimmung der Schrägsichtweite ist im Flughafenbereich hauptsächlich bei ungünstigen Sichtbedingungen wichtig, wie etwa bei Sichtweiten unter 1.5 km [20]. Dies ist der Fall bei starkem Dunst und Nebel, bei niedrig hängenden Wolken und bei Niederschlag.

Diese Messungen sind in den untersten 100 m über der Landebahn auszuführen. Nimmt man als Beispiel die Abbildung 1 mit den Sichtweiten $V_{N_2} = 100$ m, $V_{N_1} - V_{N_0} = 10$ km und eine dazugehörige Höhe der Nebelschicht von 30 m, so erhält der Pilot lediglich die Meldung "Runway Visual Range ist 100 m". Er kann aber durch die geringe Dicke der Nebelschicht durchaus die Landeichter erkennen. Man kann sich auch folgendes Extrem vorstellen, daß die Bodennebelschicht nur 10 m vertikale Ausdehnung hat und der Pilot eines Großraumflugzeuges nach der Landung noch oberhalb des Nebels wäre.

Für die Flughäfen existiert hinsichtlich der Runway Visual Range eine Einteilung in 3 Kategorien mit den in Tabelle 1 dargestellten Genauigkeiten.

Tabelle 1

Sichtkategorien mit Genauigkeitsgrenzen nach I.C.A.O.

Kategorie	RVR		Genauigkeiten		Wolkenbasis
III C	0				
III B	50	- 150 m	± 25 m		größer 0 m
III A	200	- 350 m	± 50 m		größer 0 m
II	400	- 750 m	± 50 m bis 500 m		größer 30 m
			± 100 m größer 500 m		
I	800	- 1400 m	± 100 m bis 1100 m		größer 60 m
			± 200 m darüber		

Für die Anwendung der Sichtmeßmethoden müssen diese Genauigkeiten erreicht werden können.

Es sind 4 Bedingungen, die in die Bestimmung der Schrägsichtweite eingehen:

- die physikalisch optischen Verhältnisse der Atmosphäre,
- die Menge und Verteilung des natürlichen und künstlichen Umgebungs- bzw. Hintergrundlichts,
- die Eigenschaften des Objekts, das beobachtet wird,
- die Eigenschaften des Auges bzw. des Detektors, mit dem die Beobachtung gemacht wird.

Für die Normsichtweite V_N (Gl.(5)) sind alle 4 Bedingungen berücksichtigt, da τ_r die physikalisch-optischen Verhältnisse repräsentiert, die Faktoren b und c durch die Koschmiedersche Theorie eingeführt sind und die Bedingung d durch die Benutzung der Wellenlänge $\lambda = 0,55 \mu\text{m} \pm 0,04 \mu\text{m}$ erfüllt sein muß.

Für die schräge Normsicht kann man ebenso Gültigkeit annehmen, wenn man unter einem Meßwinkel α eine Länge R_α mißt, für die der Grad der gerichteten Transmission 2 % beträgt. Mit der Gleichung (12) wurde eine Schrägsicht $V'_S(\alpha)$ definiert.

Die Messung der schrägen Normsicht kann durch Bestimmung der Transmission auf dem schrägen Sichtpfad geschehen. Nach Gl. (4) ist auch eine Bestimmung des Extinktionskoeffizienten σ_e auf der Strecke R möglich.

Der Extinktionskoeffizient $\sigma_e(\lambda)$ kann aufgeteilt werden in einen Absorptions- und in einen Streuteil.

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) + \sigma_s(\lambda) \quad (14)$$

Dabei ist $\sigma_a(\lambda)$ Absorptionskoeffizient und $\sigma_s(\lambda)$ der Streukoeffizient. Die Größen $\sigma_a(\lambda)$ und $\sigma_s(\lambda)$ werden in Einheiten von m^{-1} angegeben.

Der Streukoeffizient läßt sich weiter unterteilen in Streuteile der Moleküle $\sigma_{SR}(\lambda)$ und der Aerosolteilchen $\sigma_{SA}(\lambda)$ [15,30]:

$$\sigma_s(\lambda) = \sigma_{SR}(\lambda) + \sigma_{SA}(\lambda) \quad (15)$$

Dabei ist $\sigma_{SR}(\lambda)$ der Rayleigh-Streukoeffizient und $\sigma_{SA}(\lambda)$ der Aerosol-Streukoeffizient.

Die Sichtweite läßt sich außer mit Transmissometern auch mit Geräten bestimmen, die nur den Streukoeffizienten messen [56,57,63]. Die Messung des Streukoeffizienten erfordert wegen der Abhängigkeit der Streufunktion $\beta_s(d, \lambda, \phi)$ von der Größe der Teilchen d , der Wellenlänge λ und der Streurichtung ϕ u.a. eine Integration des gestreuten Lichts über den gesamten Winkelbereich ω . ϕ ist in der Ausbreitungsrichtung des Lichts zu sehen. Mit $d\omega = \sin \phi \, d\phi \, d\theta$ (θ = Azimutwinkel senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls. Die Streufunktion ist für die angenommenen kugelförmigen Teilchen unabhängig vom Winkel θ). Die Integration über θ ergibt 2π .

$$\sigma_s(\lambda) = 2\pi \int_0^{180^\circ} \beta_s(d, \lambda, \phi) \sin \phi \, d\phi \quad (16)$$

Die Streufunktion $\beta_s(d, \lambda, \phi)$ wird in Einheiten von $m^{-1}sr^{-1}$ angegeben. Mit der Messung des Streukoeffizienten wird z.B. die Sichtweite V_N zu

$$V_N = \frac{3.912}{\sigma_s(\lambda_i)} \left(1 - \frac{\sigma_a(\lambda_i)}{\sigma_e(\lambda_i)} \right) \cdot f(\lambda) \quad (17)$$

Man hat den Absorptionskoeffizienten $\sigma_a(\lambda_i)$ zu bestimmen und eine Funktion $f(\lambda)$ für die Umrechnung der Meßwerte bei $\lambda = \lambda_i$ auf $\lambda = 0.55 \mu m$ gegebenenfalls einzuführen.

Für die Bestimmung der schrägen Normsicht könnte man, wie bei Definition (Gl.(6)) erwähnt, im Prinzip Transmissometer auf dem Gleitpfad aufstellen [60]. Die dabei notwendig werdenden Türme im Anflugbereich stellen aber in jedem Fall eine große Gefahrenquelle dar. Der Einsatz von Fernmeßverfahren und hierbei der Lidar-Methoden bietet sich an.

2.3 Lidar-Methode

Bei der Lidar-Methode wird (in Analogie zum Radar) ein gepulster Laser als Sender verwandt. Das empfangene Signal wird als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Abb. 3 dient zur Erläuterung des Lidar Prinzips. Im oberen Teil dieser Abbildung sind die Öffnungswinkel von Laser und Teleskop für diese Erklärung übertrieben groß dargestellt. Im Normalfall sind beide Achsen parallel (oder coaxial) angeordnet und die Winkel für die Divergenz betragen einige Milliradian. Der Laser sendet einen Lichtimpuls der Dauer Δt mit der Leistung F_0 und der Wellenlänge λ in die Atmosphäre. Der Verlauf eines solchen Impulses ist in Abb. 3 gestrichelt angedeutet. Die Dauer des Impulses entspricht in der Atmosphäre einer geometrischen Ausdehnung von $\ell = c \Delta t$.

Das Licht wird auf dem Weg durch die Atmosphäre gestreut und geschwächt. Ein Teil des Lichts wird von den Molekülen und Aerosolteilchen in Rückwärtsrichtung gestreut ($\phi = 180^\circ$). Durch die übertrieben gezeichnete Darstellung der Abb. 3 ist auch der Rückstreuwinkel geändert dargestellt. Das zurückgestreute Licht kann durch einen neben dem Laser aufgestellten Teleskop mit Detektor empfangen werden [2,6,12,14,18,43,73].

Die Empfängerfläche sei $\bar{e}$. Die empfangene Strahlungsleistung aus der Entfernung R ist bei der maximalen Entfernungsauflösung $\Delta R = \ell/2$:

$$F(\lambda, R) = F_0(\lambda) \cdot \frac{c \cdot \Delta t \cdot \bar{e}}{2 R^2} \left\{ \beta_{SR}(\lambda, 180^\circ) + \beta_{SA}(\lambda, 180^\circ) \right\} \cdot \zeta(R) \cdot \exp \left\{ -2 \int_0^R \left[\sigma_{SR}(\lambda) + \sigma_{SA}(\lambda) + \sigma_a(\lambda) \right] dr \right\} \quad (18)$$

Dabei ist	$F(\lambda, R)$	= empfangene Strahlungsleistung,
	$F_0(\lambda)$	= ausgesandte Strahlungsleistung,
	ℓ	= Laserpulslänge,
	Δt	= Impulsdauer,
	$\bar{e}$	= effektive Empfängerfläche,
	$\beta_{SR}(\lambda, 180^\circ)$ und $\beta_{SA}(\lambda, 180^\circ)$	= Molekül- bzw. Aerosol-Volumenrückstreuoeffizienten in $m^{-1}sr^{-1}$ (hier nicht als $\sigma/4\pi$ angegeben),
	$\zeta(R)$	= Geometriefaktor, berücksichtigt den Überlapp zwischen Laserstrahl und Empfängercharakteristik,
	c	= Lichtgeschwindigkeit.

Um größere Signale zu erhalten und gleichzeitig das Signal/Rauschverhältnis zu verbessern, arbeitet man meistens nicht mit der maximalen Entfernungsauflösung $\Delta R_{\text{max}} = \lambda/2$, sondern mit $\Delta R = c \Delta t'/2$, wobei $\Delta t'$ die von der Empfängerlektronik noch aufgelöste Impulsbreite bedeutet. Dann steht $c \Delta t'$ anstelle von λ .

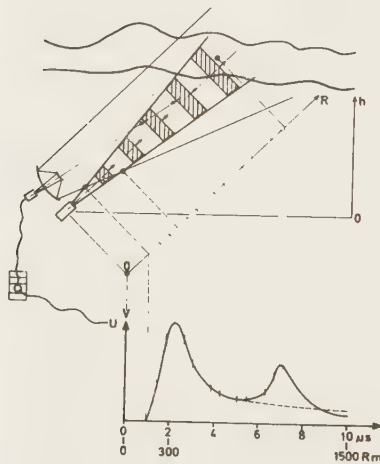


Abbildung 3: Lidar Prinzip

$\zeta(R)$ ist die Geometriekorrektur für den Überlappungsbereich, der in Abb. 3 von 0 m bis etwa 300 m in der unteren Darstellung veranschaulicht ist. In dieser Darstellung ist das Signal vom Detektor im Zeitverlauf dargestellt. Durch den Hin- und Rückweg des Lichts entspricht 1 μs Zeitdifferenz vom Zeitpunkt des Aussendens des Laserpulses bis zum Empfangen des Signals einer Entfernung von 150 m. Die in Gleichung (18) ausgedrückte $1/R^2$ -Abhängigkeit des Signals ist nach Erreichen der völligen Überlappung ($\zeta(R) = 1$) ab etwa 300 m Entfernung zu erkennen.

Inhomogenitäten im Signalverlauf lassen auf geänderte Rückstreuung schließen (etwa bei 7 μ s Zeitdifferenz vom Aussenden des Laserpulses in Abb. 3).

Die Werte $\beta_{SR}(\lambda, 180^\circ)$ und $\beta_{SA}(\lambda, 180^\circ)$ sind als Volumen-Rückstreckoeffizient für Moleküle bzw. Aerosolteilchen definiert.

Der Laserpuls wird an jedem Ort im gemeinsamen Volumen gestreut und man erhält analog zum Radar Prinzip ein Signal, welches abhängig ist von der Laufzeit, bzw. von der Entfernung (Abb. 3 unten).

Das Rückstreusignal hängt von zwei Parametern, der Extinktion und der Rückstreuung, ab. Das Signal U am Detektor ist

$$U(R) = \frac{K}{R^2} \{ \beta_{SR}(\lambda, 180^\circ) + \beta_{SA}(\lambda, 180^\circ) \} \cdot \zeta(R) \cdot \exp \cdot \\ \cdot \left\{ - 2 \int_0^R \{ \sigma_{SR}(\lambda) + \sigma_{SA}(\lambda) + \sigma_a(\lambda) \} dr \right\} \quad (19)$$

wobei in K alle Systemparameter enthalten sind (Einheit $V \text{ m}^3 \text{ sr}$).

Die Gleichung vereinfacht sich mit

$$\beta_S(\lambda, 180^\circ) = \beta_{SR}(\lambda, 180^\circ) + \beta_{SA}(\lambda, 180^\circ) \quad (20)$$

und bei voller Überlappung $\zeta(R) = 1$ sowie mit der Einführung der Transmission

$$\tau^2 = \exp \left\{ - 2 \int_0^R \{ \sigma_{SR}(\lambda) + \sigma_{SA}(\lambda) + \sigma_a(\lambda) \} dr \right\} \quad (21)$$

auf

$$U(R) = \frac{K}{R^2} \beta_S(\lambda, 180^\circ) \cdot \tau^2 \quad (22)$$

τ ist hierbei gleichbedeutend mit der gerichteten Transmission τ_r . Beim Lidar wird das Licht auf dem Weg zum Aufpunkt und vom Aufpunkt zurück extinguiert, deshalb τ^2 .

Man mißt mit einem Laserpuls die Extinktion bzw. die Rückstreuung zeitlich aufgelöst von einigen Metern bis zu einigen tausend Metern. Die Laufzeit des Lichtes bis zu einer Entfernung von 1500 m beträgt 10 Mikrosekunden. Diese kurze Zeit ist unter Umständen (z.B. bei Regen, starker Turbulenz etc.) nicht ausreichend, um den vom Auge gemittelten Zustand der Atmosphäre richtig wiederzugeben. Man wird, um gültige Aussagen zu erhalten, über einige Pulse im Abstand einiger Sekunden mitteln müssen.

Zur genauen Auswertung der Lidar Signatur sollten folgende Fragen geklärt sein, die entscheidende Frage nach der atmosphärischen Schichtung:

- a) Kann der Rückstreuoeffizient β_S als konstant oder zumindest als streckenweise konstant angesehen werden?

und die generellen Fragen:

- b) Wie ist die Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion zu berücksichtigen?
 c) Wie geht der Einfluß der Mehrfachstreuung in die Berechnung ein?
 d) Welcher Wellenlängenbereich ist im Hinblick auf die mögliche Augen-gefährdung auszuwählen?

Zu a):

Die Frage zielt darauf ab, ob man den Rückstreuoeffizienten mit in die Gerätekonstante K aufnehmen kann und dadurch mit dem Lidar direkt die Extinktion entlang einer vorgegebenen Strecke bestimmt [3,8,9,10,11,16,17,24,25,26]. Durch die gegebenen Randbedingungen für das Meßproblem (Messung bei starkem Dunst und Nebel) kann zunächst die Molekülstreuung vernachlässigt werden.

$$\beta_{SR}(\lambda, 180^\circ) \ll \beta_{SA}(\lambda, 180^\circ) ; \quad \sigma_{SR}(\lambda) \ll \sigma_{SA}(\lambda)$$

Die Rückstreuung hängt dann noch von der Aerosolverteilung in der Atmosphäre ab [32,34,38,39,41,46]. Die Aerosole sind nur bei ganz bestimmten Wetterlagen so gut gemischt [38], daß man die Rückstreuung als konstant ansehen kann [76]. Für den Normalfall kann man mit der Annahme einer streckenweise homogenen Schichtung arbeiten [47]. Abb. 2 zeigt eine mögliche Meßbedingung.

Die Abbildung stellt einen Ausschnitt der Abb. 1 dar, das Flugzeug befindet sich in etwa 30 m Höhe unterhalb einer Wolkenschicht auf dem Gleitpfad. Die streckenweise homogene Schichtung ist durch die σ_S -Werte charakterisiert. Ein Lidar am Punkt C müßte diese Schichtung erfassen können.

Zu b:

Für die Auswahl der geeignetsten Laserwellenlänge ist die Kenntnis der Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion ausschlaggebend [16, 51].

Die bereits vernachlässigte Molekülstreuung $\sigma_{SR}(\lambda)$ zeigt folgende Wellenlängenabhängigkeit

$$\sigma_{SR}(\lambda) = \gamma \cdot \left(\frac{8\pi^3}{3}\right) (m_L(\lambda)^2 - 1)^2 \frac{1}{N_L \cdot \lambda^4} \quad (23)$$

wobei m_L der Brechungsindex der Luft ist,

N_L die Zahl der Moleküle in der Volumeneinheit angibt, und

γ ein Anisotropiefaktor ist, der der Abweichung der Moleküle von der Kugelgestalt Rechnung trägt. Die Molekülstreuung ist damit angenähert proportional λ^{-4} .

Für die Molekülstreuung gilt

$$\beta_{SR}(\lambda, 180^\circ) = \frac{3}{8\pi} \sigma_{SR}(\lambda)$$

Diese Streuung wird in dieser Betrachtung wegen der Annahmen (Gl.(22)) hier nur der Vollständigkeit wegen angeführt [39].

Bei der Betrachtung der Wellenlängenabhängigkeit der Aerosolstreuung hat man zu unterscheiden zwischen der Streuung bei Dunst (oberhalb 1 km Normsicht) und der Streuung bei Nebel (unterhalb 600 m Normsicht). Bei Sichtweiten zwischen 600 m und 1 km hat man ein Streuverhalten, wie es entweder dem Dunst oder dem Nebel entspricht [4, 43, 52, 56].

Für den Dunst wurden die Aerosolmodelle für verschiedene Wellenlängen durchgerechnet und es ergibt sich angenähert ein Verlauf proportional λ^{-1} .

Bei Nebel zeigt sich bis etwa 4 μm Wellenlänge keine oder nur sehr schwache Wellenlängenabhängigkeit (Nebel ist weiß). Es folgt für den Streukoeffizienten unter Umständen ein Abfall bis zu Wellenlängen oberhalb 10 μm auf Beträge zwischen 0,1 und 0,5 des kurzwelligen Bezugswertes [9, 10, 21]. Der Absorptionskoeffizient zeigt jedoch zum Teil infolge Gasabsorption eine stärkere Wellenlängenabhängigkeit. Bei der Absorption, dargestellt durch den Absorptionskoeffizienten $\sigma_a(\lambda)$ hat man genauer noch zu unterscheiden zwischen der selektiven Absorption der gasförmigen Bestandteile und der Absorption des Dunstes. Für die Gase liegen umfangreiche Tabellenwerke vor, so daß Korrekturwerte für die benutzten Laser Wellenlängen berechnet werden können [4,10,21].

Über den Absorptionskoeffizienten des Dunstes ist nicht sehr viel bekannt, es dürfte sich um graue Kontinuumsabsorption bis etwa 2 μm handeln [17].

Zu c:

Es tritt bei den größer werdenden Aerosolteilchen bei der Streuung eine Bevorzugung der Vorwärtsrichtung ein. Diese Vorwärtsstreuung führt beim zweiten oder folgenden Streuprozess zu einer zusätzlichen Komponente in Richtung auf den Empfänger, was scheinbar mit einer Verringerung der Extinktion einhergeht. Bei geringer werdenden Sichtweiten und damit verbundenem Ansteigen der Zahl der Aerosolpartikel wird auch die Zahl der großen Partikel ansteigen. Die Mehrfachstreuung erreicht bei Sichtweiten unter 300 m nicht mehr zu vernachlässigende Werte [48, 69]. Nach Messungen von Viezee [62] ist die gemessene Sichtweite mit dem Lidar (V_{Lidar}) zu korrigieren, um auf die Schrägsichtweite $V'_S(H)$ zu kommen [13, 62].

$$V'_S(H) = 1.035 V_{\text{Lidar}} - 42.5 \text{ m für } 60 \text{ m} \leq V'_S(H) \leq 1000 \text{ m} \quad (24)$$

Zu d:

Die Schutznormen für das Auge stellen strenge Maßstäbe für die Verwendung der Laser dar [45]. Die Schutznorm für die Hornhaut des Auges eines möglichen Beobachters im Strahlengang sieht folgende in Tabelle 2 aufgeführte Grenzen der Bestrahlung mit den verschiedenen Lasern vor.

Tabelle 2

USA - Laserschutznormen-Grenzen der Bestrahlung

Laserart	Wellenlänge μm	Bestrahlung *) Jcm^{-2}
Rubin	0.6943	$1.6 \cdot 10^{-7}$
Neodym	1.064	$1.6 \cdot 10^{-6}$
Erbium	1.73	1
CO_2	10,6	$1.0 \cdot 10^{-2}$

*) aus STANAG 3606 "Beurteilung und Überwachungsmaßnahmen bei Gefährdung durch Laserstrahlen" Sept. 1977 (Militärische Standardisierung).

Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, daß man für ein Lidar System zur Sichtmessung bei gleicher Laserleistung möglichst Wellenlängen größer $1,4 \mu\text{m}$ benutzen sollte. *)

Aus den bisher dargelegten Fakten (Fragen a - d) geht hervor, daß man ein Lidar System zur Bestimmung der schrägen Normsicht auf einer vorgegebenen Meßstrecke erstellen kann, wenn man folgendes beachtet:

- eine streckenweise Homogenität der Schichtung muß vorliegen,
- Integration über mehrere Messungen,
- Wellenlänge im infraroten Spektralbereich ($> 1,4 \mu\text{m}$) oder Schutz vor Augenschäden anderer Art,
- Korrekturfunktion für die Angleichung der benutzten Wellenlänge an die Normwellenlänge ($\lambda = 0,55 \mu\text{m}$),
- Korrekturfunktion für die Mehrfachstreuung.

Im folgenden wird vorausgesetzt, daß Vorkehrungen zur Erfüllung dieser Voraussetzungen getroffen sind.

2.4 Auswertung der Lidar Signale

2.4.1 Allgemeine Grundlagen

Mit einem Lidar System erhält man ein Signal am Detektor, welches nach Gleichung (22) ausgedrückt werden kann:

$$U(R) = \frac{K}{R^2} \cdot \beta_S(\lambda, 180^\circ) \cdot \tau^2 \quad (22)$$

Für die Darstellung der Auswertung wurde die Rayleighstreuung und die Absorption vernachlässigt. Mit $K = 1 \text{ (Vm}^3\text{sr)}$ sowie mittels der Näherung für den Neodym-Glas-Laser $\beta_{SA}(1,06 \mu\text{m}, 180^\circ) = 0,022 \cdot \sigma_{SA}(1,06 \mu\text{m})$ und Gl. (5) erhält man den in Tabelle 3 aufgelisteten Signalverlauf für die vorgegebenen Sichtweiten 100 km, 10 km, 1 km und 100 m.

*) D.H. Sliney and B.C. Freasier: Evaluation of Optical Radiation Hazards, Appl. Optics 12 (1973) pp. 1 - 25

Tabelle 3: Signalverlauf bei verschiedenen Sichtweiten

$V_N =$	100 km	10 km	1 km	100 m
Entfernung R =				
50 m	$3.43 \cdot 10^{-10}$	$3.31 \cdot 10^{-9}$	$2.33 \cdot 10^{-8}$	$6.88 \cdot 10^{-9}$
100 m	$8.53 \cdot 10^{-11}$	$7.96 \cdot 10^{-10}$	$3.94 \cdot 10^{-9}$	$3.44 \cdot 10^{-11}$
200 m	$2.12 \cdot 10^{-11}$	$1.84 \cdot 10^{-10}$	$4.50 \cdot 10^{-10}$	$3.45 \cdot 10^{-15}$
400 m	$5.21 \cdot 10^{-12}$	$3.93 \cdot 10^{-11}$	$2.36 \cdot 10^{-11}$	$1.40 \cdot 10^{-22}$
600 m	$2.28 \cdot 10^{-12}$	$1.49 \cdot 10^{-11}$	$2.19 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-29}$
800 m	$1.26 \cdot 10^{-12}$	$7.19 \cdot 10^{-12}$	$2.58 \cdot 10^{-13}$	$9.10 \cdot 10^{-37}$
1000 m	$7.95 \cdot 10^{-13}$	$3.94 \cdot 10^{-12}$	$3.45 \cdot 10^{-14}$	$9.40 \cdot 10^{-44}$

Die tabellierten Werte entsprechen Spannungen, sind aber durch die Vereinfachung $K = 1$ nur relativ in der Größenordnung zu betrachten. Bei den vorgegebenen absolut homogenen Sichtweiten würde sich der Signalverlauf folgendermaßen ergeben. In 50 m Entfernung besteht für 100 km und 100 m Sichtweite ein Faktor 10^3 Unterschied in der Rückstreuung. Die Transmissionswerte sind dabei 0.02 für 100 m Sicht und 0.996 für 100 km Sicht, so daß die Signale sich wie dargestellt um einen Faktor 20 unterscheiden. Bei 100 m Entfernung ist der Transmissionswert für 100 m Sichtweite auf 0.0004 abgesunken und der Signalwert bei 100 m Sichtweite ist um den Faktor 0.4 kleiner als der Signalwert bei 100 km Sichtweite in der gleichen Entfernung.

Die Darstellung in Abbildung 4 zeigt den Verlauf der in Tabelle 3 aufgelisteten Signale $U(R)$. Man erkennt deutlich, daß in 100 m Entfernung die Signale noch in der Reihenfolge der Sichtweite beginnend bei den niedrigsten Werten geordnet sind. In 1000 m Entfernung ist diese Ordnung durch die Wirkung der Extinktion fast umgekehrt. Man hat bei einem Lidar System zur Aerosolmessung stets zwei Abhängigkeiten zu betrachten, die Rückstreuungseigenschaften und die Extinktion. Beide sind natürlich miteinander verknüpft. Die folgenden Kapitel behandeln die Auswertung der Sichtweite aus den Rückstreusignalen.

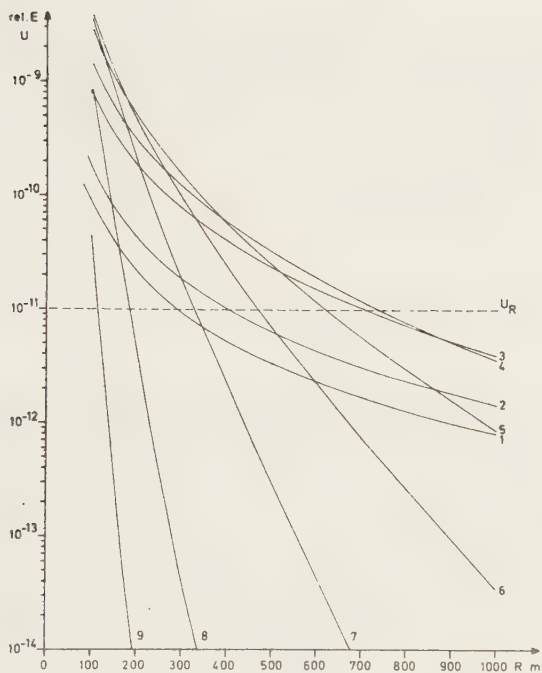


Abbildung 4: Verlauf der Signale $U(R) = \epsilon_{SAT}^2 / R^2$ mit der Entfernung R bei homogener Schichtung für die Sichtweiten:

Kurve 1:	100 km
" 2:	50 km
" 3:	10 km
" 4:	5 km
" 5:	2 km
" 6:	1 km
" 7:	0,5 km
" 8:	0,2 km
" 9:	0,1 km

(U_R ist ein Rauschwert, der unter Punkt 2.4.3 eingeführt wird).

2.4.2 Slope Methode

Die Methode wurde von Collis, Viezee und Oblanas [13, 62] entwickelt. Sie setzt eine stückweise homogen geschichtete Atmosphäre voraus [17].

Aus der Lidar Gleichung (22) erhält man einen entfernungskorrigierten Signalverlauf, die sogenannte Lidar Signatur $S(R)$: (R_i steht für den Abstand der i -ten homogenen Schicht.)

$$S(R_i) = \frac{U(R_i) \cdot R_i^2}{K} = \beta_s(R_i) \cdot \tau_i^2 \quad (25)$$

mit

$$\tau_i = \exp \left\{ - \int_0^{R_i} \sigma_e(r) dr \right\} \quad (21)$$

Zur Bestimmung der für die Sichtweitenbestimmung notwendigen Extinktion muß der Verlauf der Signatur S bestimmt werden. Die exakte Lösung fordert:

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dR} = \frac{1}{R_s} \frac{d\beta_s}{dR} - 2 \sigma_e \quad (26)$$

Wenn man annimmt, daß die Rückstreuung β_s konstant ist innerhalb eines Entfernungsbereichs $\Delta R = R_1 - R_k$, dann ist

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dR} = - 2 \sigma_e \quad (27)$$

Daraus erhält man mit Gleichung (11)

$$V'_s = - \frac{7.8 \cdot \Delta R_i}{\Delta \ln S(R_i)} \quad (28)$$

Für den Sonderfall einer absolut einheitlichen Sichtweite im Meßbereich, wie dies für die Bestimmung des Lidar Signalverlaufs dargestellt in Abb. 4 galt, zeigt Abbildung 5 den entfernungskorrigierten Signalverlauf. Die Extinktion kann aus der Neigung der Kurven direkt bestimmt werden. Die Werte $S(R)$ sind als relative Einheiten gekennzeichnet, da wie für Abb. 4 die Systemkonstante $K = 1$ gesetzt wurde. Die Einheiten sind $m^{-1}sr^{-1}$.

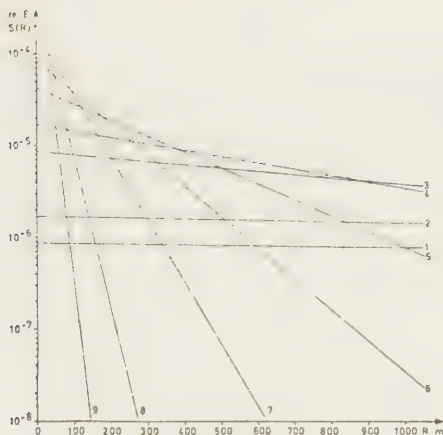


Abbildung 5: Verlauf der Lidar Signatur $S(R) = U(R) R^2/K = \beta_s \tau^2$ mit der Entfernung für die in Abbildung 4 angegebenen Sichtweiten

Für die Bestimmung der Schrägsichtweite reichen für diesen Sonderfall nach Gl. (28) und Gl. (13) 2 Stützpunkte der Kurven der Abbildung 5 aus. Für einen mehr realistischen Fall kann man eine vertikale Schichtung des Extinktionskoeffizienten bzw. der Sichtweite annehmen, wie sie in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt sind. Abbildung 6 zeigt für 3 mögliche atmosphärische Schichtungen den Verlauf der zu erwartenden Lidar Signale [75]. Es ist dabei jeweils der linear-Signalverlauf $U(R)$ (ausgezogene Kurve mit linker Skala) und der entfernungskorrigierte, logarithmische Verlauf der Lidar Signatur $S(R)$ (gestrichelte Kurve mit Skala rechts) aufgezeichnet.

Fall a zeigt die homogene Sichtweite auf der Meßstrecke, also keinerlei Schichtung, so wie es bisher im Sonderfall diskutiert ist. Fall b zeigt eine streckenweise homogene Schichtung, wie es sich für die Abbildungen 1 und 2 ergeben würde. Fall c ist eine inhomogene Schichtung am Beispiel einer Inversionslage. Der Inversionsfall c ist dadurch gekennzeichnet, daß es in einer bestimmten Höhe, der Inversionshöhe, eine Umkehr des Verlaufs des Lufttemperaturgradienten gibt. Gleichlaufend damit ist meist eine markante Änderung der relativen Feuchte. Diese nimmt bis zur Inversionshöhe stetig zu. Da ein Teil der Aerosole hygroskopisch ist, nimmt deren Gleichgewichtsradius mit der Änderung der relativen Feuchte zu oder ab. Im Falle der Inversionslage führt

dies dazu, daß die Gleichgewichtsradien bis zur Inversionshöhe zunehmen und damit verbunden auch die Rückstreuung zunimmt [27, 28, 29, 61, 65, 66, 67]. Oberhalb der Inversion ist meist durch die mit einer Inversion verbundenen Trennung von Luftmassen ein wesentlich verringerter Aerosolgehalt [59] anzutreffen, was ein rapides Abfallen des Lidar Signals zur Folge hat.

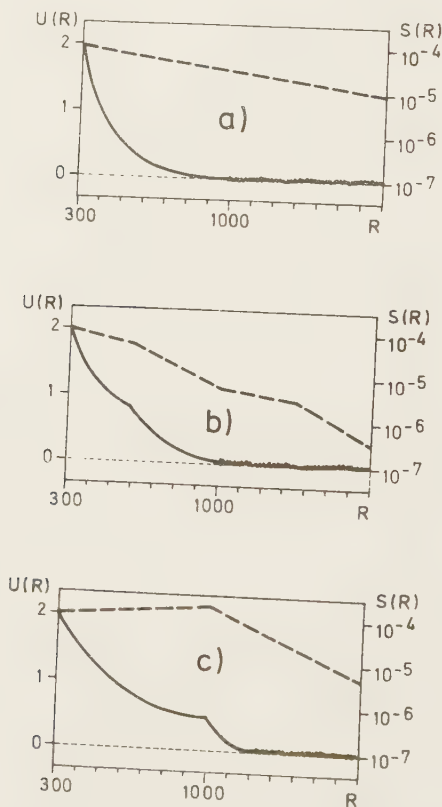


Abbildung 6: Lidar Signale $U(R)$ sowie der Lidar Signaturverlauf $S(R)$ (gestrichelt, Skala rechts) bei verschiedenen atmosphärischen Bedingungen:

- a) homogene Sichtbedingungen
- b) streckenweise homogene Sichtbedingungen
- c) inhomogene Sichtbedingungen

Im Gegensatz zu der bisher generell geführten Diskussion der Möglichkeiten des Einsatzes der Slope Methode für die verschiedenen Schichtungen soll nun die reale Atmosphäre betrachtet werden. Durch den Windeinfluß und die thermische Turbulenz wird das Aerosol stets inhomogen verteilt sein. Hinzu kommt am Detektor eine Rauschkomponente U_R . Abb. 7 zeigt ein Meßbeispiel von Viezee et.al. [62]. ($S(R)$ ist im logarithmischen Maßstab dargestellt.)

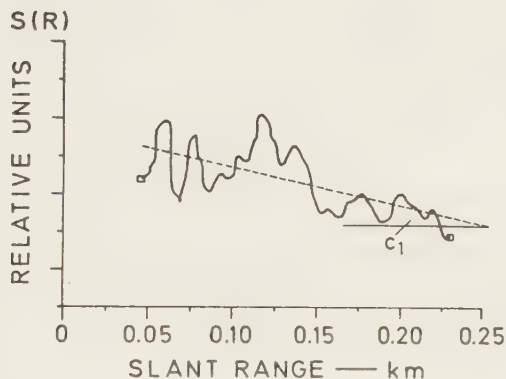


Abbildung 7: Meßbeispiel von Viezee et.al. [62] zur Erklärung der Slope-Methode

Der Verlauf der Einzelwerte $S(R)$ und die mögliche Slope Funktion (gestrichelt) sind dargestellt. Die gestrichelte Linie wurde gewonnen aufgrund der Linearisierung mittels der Methode der kleinsten Quadrate (siehe hierzu Punkt 4.5.1). Die Ermittlung der Slope Funktion setzt voraus, daß das Meßsignal mittels eines Transient Recorders aufgenommen und gespeichert wurde. Da diese Geräte relativ teuer sind, hat sich diese Methode in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Ein Beispiel einer Auswertung einer Meßreihe der oben genannten Autoren ist in Abb. 8 dargestellt.

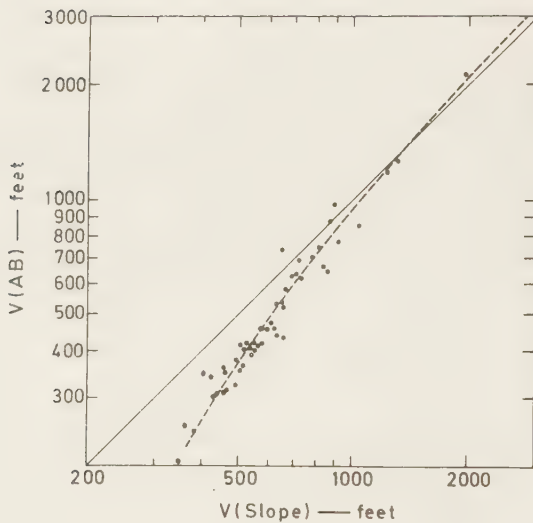


Abbildung 8: Meßergebnisse von Viezee et al [62]:
 Vergleich der mit der Slope-Methode bestimmten
 Schrägsichtweite (V_{Slope}) mit der mit dem
 Transmissometer bestimmten Schrägsichtweite (V_{AB}).

Die Sichtweiten mit dem Transmissometer auf einem schrägen Pfad gemessen (V_{AB}) sind gegen die Lidar Meßdaten (V_{Slope}) aufgetragen. Die Sichtweitenangaben sind in Fuß! Aus Vergleichen bei Sichtweiten über 1000 m, die eine exakte Übereinstimmung ergaben, wurde die durchgezogene Linie postuliert. Die Meßpunkte weichen bei Sichtweiten kleiner als 300 m von dieser Kurve ab. Die gestrichelte Linie gibt den mittleren Verlauf der Meßwerte an (Gl. (24)). Unterhalb von Sichtweiten von 300 m tritt, wie oben erwähnt, der Mehrfachstreuung einfluß dadurch in Erscheinung, daß eine geringere Extinktion vorge-
 täuscht wird, die zu größeren Sichtweiten führt.

2.4.3 Reichweitenmethode

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Slope-Methode eingeführt. Es war dabei noch nicht nötig, einen weiteren Signalanteil, nämlich das Signalrauschen, anzugeben. Da dies für dieses und die folgenden Kapitel wichtig wird, soll hier eine kurze Einführung stattfinden (mehr unter Punkt 4.3). Der Rauschstrom eines Lichtempfängers rührt her von den inneren Rauschquellen (Schrotrauschen, Wärmerauschen) und den Rauschströmen, die durch das auf die lichtempfindliche Schicht fallende Sekundärlicht verursacht werden. Für eine Fotodiode ergibt sich am Arbeitswiderstand R_a folgende Störspannung U_R [44]:

$$U_R = R_a \cdot i_a = R_a \sqrt{i_{HR}^2 + i_{DR}^2 + i_{RR}^2} \quad (29)$$

Dabei bedeuten:

- I_{HR} = Rauschstrom durch R_a verursacht durch die Hintergrundstrahlung (Sekundärlicht),
- i_{DR} = Rauschstrom durch R_a verursacht durch den Dunkelstrom des Elements, und
- i_{RR} = Wärmerauschstrom des Innenwiderstandes R_i des Detektorsystems.

Je nachdem, welcher der drei Summanden unter der Wurzel überwiegt, spricht man von Systemen, die vom Hintergrundrauschen, vom Schrotrauschen oder vom thermischen Rauschen begrenzt sind. Die Fotodiode ist ein vom thermischen Rauschen begrenztes System.

Das Rauschsignal U_R addiert sich zum Meßsignal $U(R)$ zu einem Gesamtsignal $U'(R)$:

$$U'(R) = U(R) + U_R \quad (30)$$

Es wird im weiteren angenommen, daß Signalanteile durch den Hintergrund kompensiert oder vernachlässigt werden können gegenüber dem thermischen Rauschen. Sonst würde die Sichtweitenbestimmung eine Funktion der Tageszeit.

Die Reichweitenmethode ist eine Umsetzung der Definition der SVR (wie weit das Landelicht noch gesehen werden kann) in die Technik. Bei der Reichweitenmethode wird die Entfernung gemessen, bis zu der ein ausgesandter Lichtpuls noch nachgewiesen werden kann. Sie wurde für die Benutzung von Blitzlampen als Lichtquellen vorgeschlagen [78], läßt sich aber besser mit Lasern durchführen.

Eine periodisch gepulste Strahlung wird in Anflugrichtung ausgesandt. Im Unterschied zu Abb. 3 hat man zwei Empfänger, die das zurückgestreute Licht aus dem Überschneidungsbereich von Laser und Empfängern von 100 m bis 3000 m nachweisen. Beide Empfänger sehen das gleiche Volumen, haben aber unterschiedlich lange Detektionsintervalle $\Delta t'$ (Zeittore). Das Zeittor des ersten Empfängers ist z.B. doppelt so lang wie das des zweiten. Es empfängt somit auch einen größeren Anteil zurückgestreuter Strahlung. Die Signale der beiden Empfänger werden durch eine Differenzschaltung miteinander verglichen. Verschiebt man beide Zeittore zu größeren Zeiten, d.h. für eine Messung des Signals aus größeren Entfernungen, so wird schließlich am Ausgang des Differenzverstärkers kein Signal mehr erscheinen, wenn der Signalunterschied nur noch durch das Rauschen beeinflusst wird.

Die Reichweitenmethode bestimmt den Zeitpunkt des Erreichens des Rauschens. In Abb. 4 ist neben den Signalen $U(R)$ (in Einheiten von $\beta_S \tau^2/R^2$) auch eine mögliche Rauschspannung U_R eingezeichnet. Würde man diesen Rauschanteil von $1 \cdot 10^{-11}$ V annehmen, so könnte man das Erreichen dieser Grenze für die verschiedenen Sichtweiten angeben. Die zugehörigen Entfernungen R_R (Schnittpunkte in Abb. 4 der Kurven $U(R)$ mit U_R nehmen nicht eindeutig mit der Sichtweite zu. Man erhält vielmehr folgende Reihenfolge:

100 m
 200 m
 100 000 m
 500 m
 50 000 m
 1 000 m
 2 000 m
 10 000 m
 5 000 m

Dies demonstriert wieder den gekoppelten Einfluß von Rückstreuung und Extinktion. Abb. 9 verdeutlicht nochmals die Mehrdeutigkeit der reinen Reichweitenmethode für andere Sichtweiten als in Abb. 4 gezeigt.

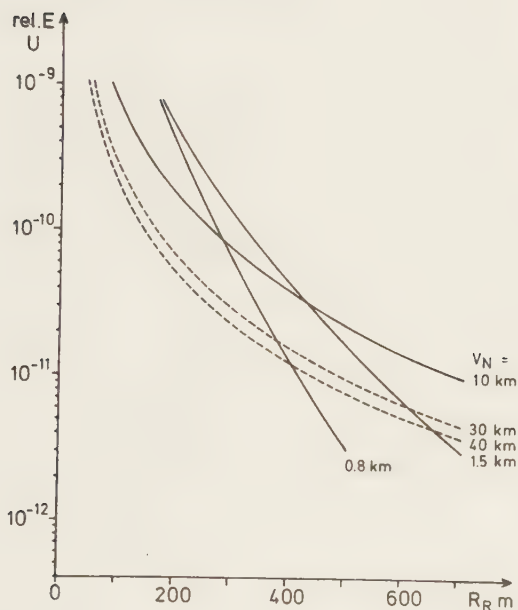


Abbildung 9: Verlauf der Signale β_{st}^2/R^2 mit der Entfernung bei homogener Sichtweite mit dieser als Parameter.

Bei einer relativen Rauschspannung U_R um $1 \cdot 10^{-11} V$ muß zur Bestimmung der Sichtweite nach der Reichweitenmethode eine weitere unabhängige Messung vorliegen, um zwischen Sichtweiten von 0.8 km und 40 km unterscheiden zu können. Diese Mehrdeutigkeit kann an Flughäfen unter Umständen aus den Daten der Normsichtweite beseitigt werden. Damit ist zwar die Mehrdeutigkeit einzugrenzen, die Schwierigkeiten bei inhomogener Schichtung (Fall c der Abb. 6) sind aber noch nicht gelöst.

Die bisher bekannten und diskutierten Methoden zur Bestimmung der schrägen Nornsicht aus dem Lidar Signal waren entweder mit großem elektronischen Aufwand verbunden oder nur im Zusammenhang mit einer weiteren Sichtbeobachtung eindeutig [35, 44, 55, 78].

Eine Kombination der Slope-Methode mit der Reichweitenmethode sollte einen brauchbaren Kompromiß ergeben, und die Fragestellung lautet, wie weit es möglich sein wird, den Aufwand der Slope-Methode zu reduzieren. Für homogene Sichtbedingungen wird man nach Abb. 5 mit zwei Stützpunkten in beliebiger Entfernung auskommen. Es ist Aufgabe dieses Kapitels, die Genauigkeitsgrenzen des Zwei-Punkt-Verfahrens auch für inhomogene Schichtungen der realen Atmosphäre zu bestimmen.

3.1 Grundlagen bei homogenen Sichtbedingungen

Abb. 10 a zeigt zur Verdeutlichung des Zwei-Punkt-Verfahrens nochmals ein Signal, wie man es bei Benutzung linearer Verstärkung für einen Laserpuls erhält.

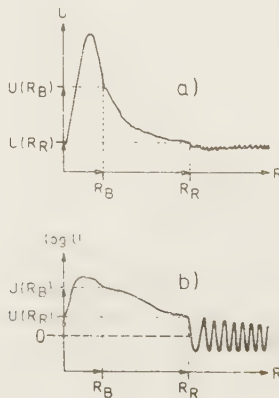


Abbildung 10: Prinzip des Zwei-Punkt-Verfahrens (linear- (a) und logarithmisch- (b) verstärktes Signal)

Man kann sich analog zur Slope-Methode bei zwei Entfernungen R_B und R_R die zugehörigen Spannungswerte herausgreifen und erhält folgende Beziehungen für die Spannungswerte

$$U(R_B) = \frac{K}{R_B^2} \cdot \beta_S(R_B) \tau_{R_B}^2 \quad (31)$$

$$U(R_R) = \frac{K}{R_R^2} \cdot \beta_S(R_R) \tau_{R_R}^2 \quad (32)$$

Unter der Annahme einer homogenen Sichtweite, was bedeutet

$$\begin{aligned} \beta_S(R_B) &= \beta_S(R_R) = \beta_S \\ \sigma_S(R_B) &= \sigma_S(R_R) = \sigma_S \end{aligned} \quad (33)$$

erhält man eine Beziehung

$$\frac{U(R_R) \cdot R_R^2}{U(R_B) \cdot R_B^2} = \exp \{ - 2 \sigma_S (R_R - R_B) \} \quad (34)$$

oder umgeformt

$$\sigma_S = \frac{1}{2(R_R - R_B)} \ln \frac{U(R_B) R_B^2}{U(R_R) R_R^2} \quad (35)$$

und mit Gl. (12)

$$V'_S = \frac{7.82 \cdot \Delta R}{\ln \frac{U(R_B) R_B^2}{U(R_R) R_R^2}} \quad (36)$$

die nur noch 4 Meßgrößen enthält.

Wenn man nun in Übereinstimmung mit Gl. (12) annimmt, daß die Strecke $2(R_R - R_B)$ gleich der Strecke R ist, für die der Grad der gerichteten Transmission 2 % beträgt, und man weiter annimmt, daß diese 2 % auf das Signal $U(R)$

übertragen gerade der Rauschspannung U_R entsprechen, dann kann man hier die Reichweitenmethode mit der Slope-Methode verbinden. Man hat eine je nach Detektor und Verstärker bekannte Rauschspannung U_R und bestimmt wie bei der Reichweitenmethode mittels Zeitmessung eine zugehörige Rauschentfernung R_R . Weiterhin benötigt man als zweiten Punkt ein Signal $U(R_B)$ am Beginn des Signalverlaufs bei der Entfernung R_B . Dies kann gewonnen werden durch eine einzige Spannungsmessung nach einer Zeit, die der Entfernung R_B entspricht. Dieses ist eine bekannte Technik. Das Meßproblem bleibt somit die Messung der Entfernung R_R , hierfür bietet sich ein logarithmischer Verstärker in Abwandlung zur Torschaltung der Reichweitenmethode an. Abbildung 10b zeigt das logarithmisch verstärkte Signal. Bewirkt durch die gleiche Verstärkung für positive wie negative Spannungen wird bei Erreichen der Rauschspannung ein Nulldurchgang beim logarithmisch verstärkten Signal erfolgen. Die Messung der Rauschentfernung reduziert sich zu einer bei Entfernungsmessern bekannten Start-Stop-Zählung.

3.2 Prinzip bei stückweise homogener Schichtung

Im Prinzip wird eine Schichtung, wie sie in Abbildung 6 dargestellt wurde, behandelt. Zunächst soll untersucht werden, wie groß eine Inhomogenität bei sonst gleicher Sichtweitenverteilung sein muß, um einen erfaßbaren Einfluß auf das Meßergebnis zu haben. Aus Abb. 6b ist es ersichtlich, daß man allein aus zwei Punkten über die gesamte Strecke keine detaillierte Aussage erhält. Über die möglicherweise vorliegende Schichtung kann aber eine Messung unter einem weiteren Winkel Aufschluß geben [5, 54, 75].

Abb.11 zeigt das Modell. Die Meßwinkel seien α_1 und α_2 .

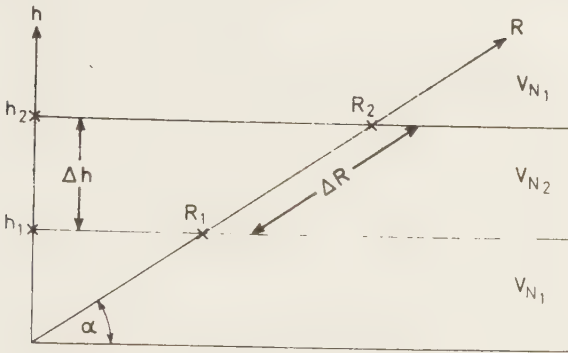


Abbildung 11: Prinzip der Messung bei stückweise homogener Schichtung

In Anlehnung an Gleichung (31) und (32) bestimmt man unter den Winkeln α_1 und α_2 folgende Größen, wobei $\tau_{R_B}^2$ und $\tau_{R_R}^2$ explizit dargestellt sind:

$$U(R_B)_{\alpha_1} = \frac{K}{R_{B\alpha_1}^2} \beta_{S1} e^{-2\sigma_{S1} R_{B\alpha_1}} \quad (37)$$

$$U(R_R)_{\alpha_1} = \frac{K}{R_{R\alpha_1}^2} \beta_{S1} e^{-2(\sigma_{S1} R_{1\alpha_1} + \sigma_{S2} (R_2 - R_1)_{\alpha_1} + \sigma_{S1} (R_R - R_2)_{\alpha_1})} \quad (38)$$

$$U(R_B)_{\alpha_2} = \frac{K}{R_{B\alpha_2}^2} \beta_{S1} e^{-2\sigma_{S1} R_{B\alpha_2}} \quad (39)$$

$$U(R_R)_{\alpha_2} = \frac{K}{R_{R\alpha_2}^2} \beta_{S1} e^{-2(\sigma_{S1} R_{1\alpha_2} + \sigma_{S2} (R_2 - R_1)_{\alpha_2} + \sigma_{S1} (R_R - R_2)_{\alpha_2})} \quad (40)$$

In Abbildung 11 sind die Normsichtweiten V_{N1} und V_{N2} angegeben zu denen die Streukoeffizienten σ_{S1} und σ_{S2} sowie die Rückstreukoeffizienten β_{S1}

und β_{S2} gehören. Es wurde weiterhin angenommen, daß $R_{B\alpha i} < R_1$ und $R_{R\alpha i} > R_2$ ist.

Mit den zusätzlichen meßtechnischen Vereinbarungen der festen Entfernung R_B und der bekannten Rauschspannung U_R wird

$$R_{B\alpha_1} = R_{B\alpha_2} = R_B \Rightarrow U(R_B)_{\alpha_1} = U(R_B)_{\alpha_2} = U_B$$

$$U(R_R)_{\alpha_1} = U(R_R)_{\alpha_2} = U(R_R)$$

Weiterhin wird zur Abkürzung eingeführt

$$\Delta R_{\alpha i} = (R_2 - R_1)_{\alpha i} \quad (41)$$

Damit wird mit jeder Messung mit dem Zwei-Punkte Verfahren unter den Winkeln bestimmt:

$$\frac{U(R_R) R_{R\alpha_1}^2}{U(R_B) R_B^2} = e^{-2 \{ \sigma_{S1} (R_{R\alpha_1} - R_B - \Delta R_{\alpha_1}) + \sigma_{S2} \Delta R_{\alpha_1} \}} \quad (42)$$

$$\frac{U(R_R) R_{R\alpha_2}^2}{U(R_B) R_B^2} = e^{-2 \{ \sigma_{S1} (R_{R\alpha_2} - R_B - \Delta R_{\alpha_2}) + \sigma_{S2} \Delta R_{\alpha_2} \}} \quad (43)$$

oder umgeformt

$$\sigma_{S1} (R_{R\alpha_1} - R_B - \Delta R_{\alpha_1}) + \sigma_{S2} \Delta R_{\alpha_1} = \frac{1}{2} \ln \frac{U(R_B) R_B^2}{U(R_R) R_{R\alpha_1}^2} \quad (42)$$

$$\sigma_{S1} (R_{R\alpha_2} - R_B - \Delta R_{\alpha_2}) + \sigma_{S2} \Delta R_{\alpha_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{U(R_B) R_B^2}{U(R_R) R_{R\alpha_2}^2} \quad (43)$$

Man kann damit nach den Streukoeffizienten auflösen und erhält

$$\sigma_{S2} = \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{R_B^2 U(R_B)}{U(R_R) R_{R\alpha_1}^2} - \frac{1}{2} \ln \frac{U(R_B) R_B^2}{U(R_R) R_{R\alpha_2}^2}}{\Delta R_{\alpha_1} (R_{R\alpha_2} - R_B - R_{\alpha_2}) - \Delta R_{\alpha_2} (R_{R\alpha_1} - R_B - \Delta R_{\alpha_1})} \quad (44)$$

$$\sigma_{S1} = \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{U(R_B) R_B^2}{U(R_R) R_{R\alpha_1}^2} - \sigma_{S2} \Delta R_{\alpha_1}}{R_{R\alpha_1} - R_B - \Delta R_{\alpha_1}} \quad (45)$$

Abbildung 12 zeigt die berechneten Signale $U(R) = \beta_s \tau^2 / R^2$ für folgende

Schichtung: 0 bis 100 m Höhe $V_{N1} = 10$ km,

100 bis 200 m Höhe $V_{N2} = 5$ km,

200 m und darüber $V_{N1} = 10$ km.

Die Meßwinkel sind 0° , 5° , 10° und 90° .

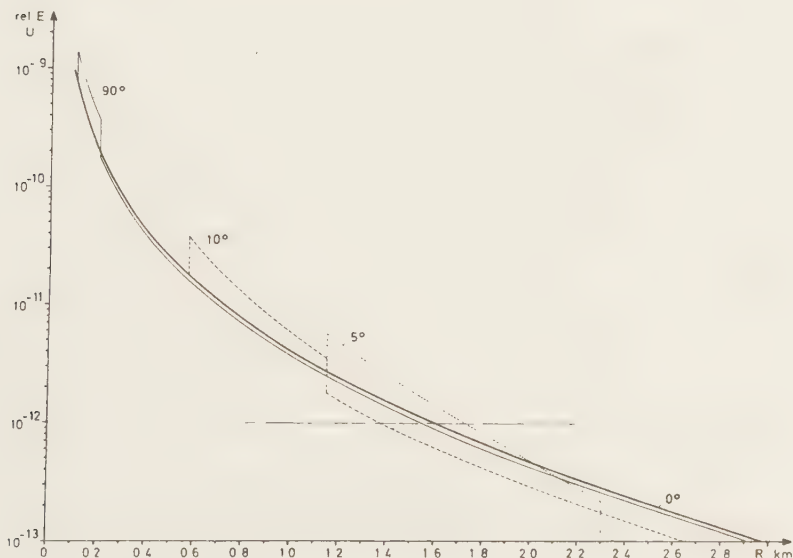


Abbildung 12: Berechnete Signale $U(R) = \beta_s \tau^2 / R^2$ für eine stückweise homogene Schichtung unter den als Parameter angegebenen Meßwinkeln.

Man erkennt, daß bei einem angenommenen Rauschspannungswert von 10^{-12} Einheiten die Reichweite R_R je nach Meßwinkel zwischen 1,4 km und 1,8 km schwanken kann. Die Messung gegen den Zenit liegt in der Mitte.

Es drängt sich die Frage auf, wie groß die Dicke ΔR einer möglichen Inhomogenität sein darf, um ein Meßergebnis gerade noch nicht zu beeinflussen.

Als Beispiel dafür wird der Fall untersucht, daß in einer homogenen Sichtweitenverteilung eine Inhomogenität an der Stelle $R < R_R$ auftritt. Als Sichtweite wird diesmal 5 km angenommen. Die Änderung der Sichtweite sei mit $V_{N_{12}} = 3,5$ km zu kleineren Sichtweiten hin und mit $V_{N_{12}} = 8,75$ km zu größeren Sichtweiten hin angenommen. Der Einfluß der Dicke ΔR dieser Schicht bestimmt sich mit Gl. (32)

$$U(R)_{\alpha_i} = \frac{K \beta_s}{R_{R\alpha_i}^2} e^{-2(\sigma_{01}(R_R - \Delta R) + \sigma_{12} \Delta R)} \quad (46)$$

Mit den Annahmen

$$\beta_s = 0,022 \sigma_s$$

$$\sigma_s = 3,91/V_{N_i}$$

$$K = 1$$

wird

$$U(R) = \frac{8,602 \cdot 10^{-2}}{V_{N_{01}} R_R^2} e^{-7,82 \left(\frac{R_R - \Delta R}{V_{N_{01}}} + \frac{\Delta R}{V_{N_{12}}} \right)} \quad (47)$$

und damit R:

$$\Delta R = \frac{-\frac{1}{7,82} \ln \left(\frac{U_R V_{N_{01}} R_R^2}{8,602 \cdot 10^{-2}} \right) - \frac{R_R}{V_{N_{01}}}}{\frac{1}{V_{N_{12}}} - \frac{1}{V_{N_{01}}}} \quad (48)$$

Abb. 13 zeigt den Einfluß von ΔR auf die Reichweite R_R oder die Genauigkeit der Sichtmessung. Der 2 %-Wert ist angegeben. Da die Reichweite in erster Näherung proportional zur Sichtweite ist, ergibt eine Verbesserung der Sicht (8,75 km) eine Verbesserung der Reichweite. Der Einfluß wird nach dieser Darstellung bei Luftpaketen von 100 m Mächtigkeit merkbar. Diese Darstellung zeigt, daß das Verfahren relativ genaue Meßwerte erlaubt. Es soll deshalb auf den Fall der inhomogenen Schichtung erweitert werden.

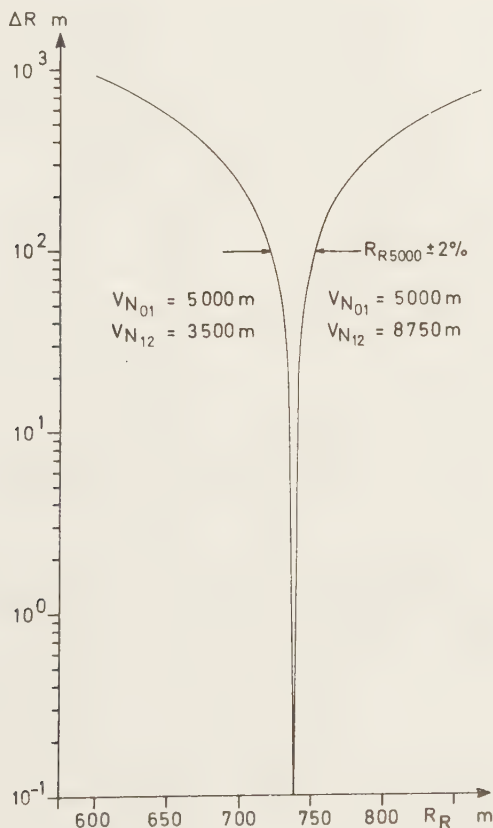


Abbildung 13: Einfluß einer Inhomogenität der Dicke ΔR auf die Reichweite R_R bei ansonsten homogener Schichtung von 5 km Normsicht

3.3 Prinzip bei inhomogener Schichtung

Abbildung 14 zeigt schematisiert die Aerosolverteilung anhand des Verlaufs der Sichtweite V_N bzw. der Streu- und Rückstreuoeffizienten bei inhomogener Schichtung, wie sie häufig bei Inversionslagen auftritt [59] (Abb. 6c). Rechts daneben sind die Meßrichtungen angegeben.

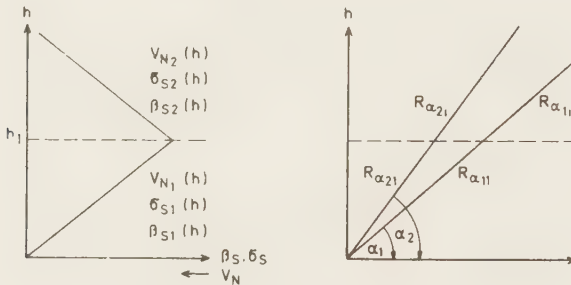


Abbildung 14: Prinzip der Messung bei inhomogener Schichtung

links: Schichtung anhand des Verlaufs der Sichtweite bzw. der Streukoeffizienten

rechts: Meßrichtungen, der erste Index bezieht sich auf Meßwinkel, der zweite auf die Schichten.

Eine Zunahme der Rückstreuung bis zur Inversionshöhe h_I infolge der Quellung der Aerosolteilchen mit der Zunahme der relativen Feuchte ist das Merkmal dieser Schichtung.

Man erhält Signale $U(R)$ unter dem Winkel α_1 nach folgender Beziehung

$$U(R_{\alpha_1}) = \frac{K}{R_{\alpha_{1j}}^2} \beta_S(R, \alpha_1) e^{-2 \left(\int_0^{R_{\alpha_{11}}} \sigma_{S1}(R, \alpha_1) dR + \int_{R_{\alpha_{11}}}^{R_{\alpha_{1j}}} \sigma_{S2}(R, \alpha_1) dR \right)} \quad (49)$$

oder umgerechnet auf die Höhe h

$$U(h) = \frac{K'}{h_i^2} \beta_S(h_i) \sin^2 \alpha_1 e^{-\frac{2}{\sin \alpha_1} \left(\int_0^{h_I} \sigma_{S1}(h) dh + \int_{h_I}^{h_i} \sigma_{S2}(h) dh \right)} \quad (50)$$

Wenn man die Höhenabhängigkeit der Rückstreuung durch folgendes Polynom berücksichtigt

$$\beta_s(h) = b_{s0} + b_{s1} h + b_{s2} h^2 + b_{s3} h^3 + b_{s4} h^4 \quad (51)$$

erhält man mit $h = R_\alpha \sin \alpha$ und mit der Beziehung $\beta_s / \sigma_s = c_{\beta_s}$ die Extinktion durch Streuung zu

$$\int_0^{R_{\alpha_{11}}} \frac{1}{\sigma_s(R, \alpha_1)} dR = \int_0^{R_{\alpha_{11}}} \frac{1}{c_{\beta_s}} \{ b_{s0} + b_{s1}(R_{\alpha_1} \sin \alpha_1) + b_{s2}(R_{\alpha_1} \sin \alpha_1)^2 + b_{s3}(R_{\alpha_1} \sin \alpha_1)^3 + b_{s4}(R_{\alpha_1} \sin \alpha_1)^4 \} dR \quad (52)$$

Im folgenden Kapitel werden mögliche Schichtungen und auch dieser Inversionsfall durchgerechnet.

3.4 Allgemeines Rechenprogramm mit einer Analyse möglicher Schichtungen

Ein allgemeines Rechenprogramm wurde entwickelt, um die Signale $U(R)$ für verschiedenste Schichtungen tabellieren zu können. Dies war notwendig, um die Messungen unter verschiedenem Meßwinkel interpretieren zu können. Für jeden Winkel läßt sich damit auch ein Rauschwert R_R angeben, mit dem man unter Benutzung des Zwei-Punkt-Verfahrens die Sichtweite in Richtung dieses Winkels angeben kann.

Die Atmosphäre sei in n horizontale Schichtungen unterteilt. Die Schichtobergrenzen seien $h_1, h_2, \dots, h_n$. Für jede Schicht existiere ein Rückstreuoeffizient β_s als Funktion der Höhe. β_s kann in der Schicht i homogen sein oder nach einem Polynom zu berechnen sein:

$$\beta_{s_i}(h) = p_{s_i}(h) = b_{s0i} + b_{s1i} h + b_{s2i} h^2 + b_{s3i} h^3 + b_{s4i} h^4 \quad (51)$$

Das Signal ist

$$U(R) = \frac{K}{R_\alpha^2} \beta_s(R_i, \alpha) e^{\frac{-2}{c \beta_s} \sin \alpha} \left\{ \int_0^{h_1} P_{s1}(h) dh + \dots + \int_{h_{i-1}}^{h_i} P_{si}(h) dh \right\} \quad (53)$$

Das Rechenprogramm tabelliert die Funktion $U(R)$ für folgende Parameter:

- K = Systemkonstante,
- $c \beta_s$ = Verhältnis Rückstreuung zu Gesamtstreuung,
- U_R = Rauschspannung,
- h_i = Schichtgrenzen,
- $b_{si,j}$ = Höhenabhängigkeit der Rückstreuung als Faktoren,
- α = Meßwinkel.

Es errechnet weiterhin eine maximale Reichweite R_R für ein vorgegebenes U_R . Die folgenden Abbildungen 15 - 17 geben Beispiele für Berechnungen für einige ausgewählte Schichtungen.

Abbildung 15 stellt eine Berechnung der inhomogenen Schichtung der Abbildungen 14 oder 6 c dar. Berechnet wurde die maximale Reichweite R_R für die Schichtung, wie sie in Abbildung 15 rechts oben dargestellt ist: Es ist ein Abfall der Normsicht von 10 km am Boden auf 8 km in der Inversionshöhe h_I in 500 m Höhe und danach ein schneller Anstieg auf 20 km in 600 m Höhe angenommen (für Kurven 1 - 3). Im weiteren Verlauf ist der Anstieg der Sichtweite weiterhin linear mit der Höhe, aber nicht mehr so sprunghaft.

Bei verschiedenen Rauschspannungen U_R wurde die Reichweite R_R in Abhängigkeit vom Meßwinkel α berechnet:

- Kurve 1: $U_R = 2 \cdot 10^{-13}$ rel. Einheiten
- Kurve 2: $U_R = 5 \cdot 10^{-13}$ "
- Kurve 3: $U_R = 8 \cdot 10^{-13}$ "

Weiterhin eingezeichnet ist die Inversionshöhe h_I als Parameter, wie sie unter einem Meßwinkel α bei der Entfernung R_R erreicht wird ($h_I = R_R \cdot \sin \alpha$).

Man erkennt, daß je niedriger die Rauschgrenze U_R ist, desto größer wird die Reichweite. Der Verlauf der Kurven ist gleichförmig. Der starke Abfall oberhalb der Inversionsgrenze ist dadurch zu erklären, daß das Signal durch die sprunghaft geringer werdende Rückstreuung abfällt und dadurch die Reichweite oberhalb eines gewissen Erhebungswinkels geringer wird. Bezogen auf die Inversionshöhe h_I wird die Sichtgrenze bei geringerer Rauschgrenze unter einem kleineren Winkel erreicht als bei höherer Rauschgrenze U_R .

Kurve 4 in Abbildung 15 gilt für die Rauschgrenze $U_R = 5 \cdot 10^{-13}$ rel. Einheiten (vergleichbar mit Kurve 2), aber mit geänderten Schichtgrenzen: Der Abfall der Normsicht von 10 km am Boden findet bei Kurve 4 auf ebenfalls 8 km statt, aber bis in eine Inversionshöhe von 800 m, der Abfall ist also flacher.

Der schnelle Anstieg der Sichtweite ist dann zwischen 800 m und 900 m.

Für diese Kurve 4 wurde auch die schräge Sichtweite V'_S berechnet (Maßstab rechts). Im Gegensatz zur angenommenen Schichtung erhält man einen Anstieg der Sichtweite V'_S bis zur Inversionshöhe h_I , daraufhin einen deutlichen Abfall. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt in der doppelten Abhängigkeit des Signals von Rückstreuung und Extinktion. Ein Anstieg der Rückstreuung täuscht eine geringere Extinktion und damit eine größere Sichtweite vor. Umgekehrt, und dies ist oberhalb der Inversion der Fall, wird bei geringer werdender Rückstreuung eine stärkere Extinktion und damit eine geringere Sichtweite gemessen (5 km statt über 20 km!). Die Slope-Methode wird von der gleichen Abhängigkeit getroffen. Im Falle der Inversionslage ist die schräge Normsicht nach dem 2-Punkte-Verfahren nur bis zum Erreichen der Inversionshöhe angenähert exakt zu bestimmen. Eine Entscheidung über das Erreichen der Inversionshöhe läßt sich durch die Messung unter verschiedenem Erhebungswinkel treffen. Da man aus der Messung unter zwei Winkeln auf eine mögliche Schichtung schließen kann, wenn R_R gemessen unter α_1 ungleich R_R gemessen unter α_2 ist, kann man weiter fahren und unter mehreren Meßwinkeln ein Maximum für R_R bestimmen. Die Inversionshöhe h_I errechnet sich aus dem Winkel α , für den die Reichweite R_R ein Maximum erreicht: $h_I = R_R (\max) \sin \alpha$.

Dieser Inversionsfall ist zwar für die Flugzeugbewegungen von geringerem Interesse, er bot sich aber zur Erklärung des Verfahrens und des Rechenprogramms an [58]. Wichtiger für die Flughäfen ist die Bestimmung der schrägen Normsicht bei Nebel und Hochnebel.

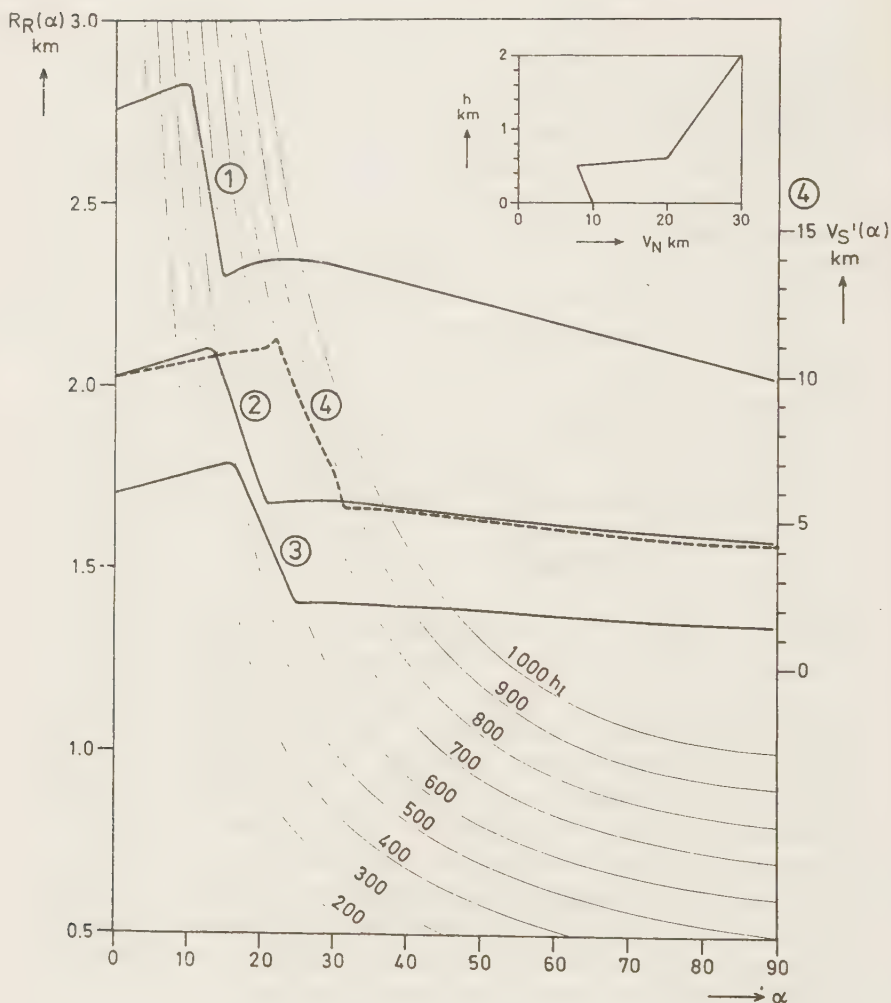


Abbildung 15: Berechnete Reichweite R_R in Abhängigkeit vom Meßwinkel α für die Inversionslage.

Die Kurven 1 ~ 3 gelten für die Schichtgrenzen nach der Abbildung rechts oben:

$V_N(\text{Boden}) = 10 \text{ km}$, $V_N(500 \text{ m}) = 8 \text{ km}$, $V_N(600 \text{ m}) = 20 \text{ km}$, $V_N(2000 \text{ m}) = 30 \text{ km}$.

Für Kurve 4 wurde geändert: $V_N(800 \text{ m}) = 8 \text{ km}$, $V_N(900 \text{ m}) = 20 \text{ km}$.

Für das Erreichen der Reichweite R_R gelten folgende Rauschspannungen:

Kurve 1: $2 \cdot 10^{-13}$ Einheiten, Kurve 2 u. 4: $5 \cdot 10^{-13}$ Einheiten, Kurve 3: $8 \cdot 10^{-13}$ Einheiten

Abbildung 16 zeigt die Reichweite R_R in Abhängigkeit vom Erhebungswinkel α bei einer Bodennebelschicht. Die Schichtung mit dem angenommenen Verlauf der horizontalen Normsicht ist links oben dargestellt.

Eine Nebelschicht von 200 m Mächtigkeit und 500 m Normsicht ist angenommen, darüber innerhalb 100 m ein rapider Anstieg der Sicht auf 10 km und ab 300 m ein langsames Ansteigen der Normsicht. Die Reichweite ist bei einer Rauschgrenze $U_R = 1 \cdot 10^{-13}$ rel. Einheiten berechnet. Unter kleinem Erhebungswinkel bis etwa 25° ist die Reichweite konstant. Sobald der Laserstrahl die Nebelobergrenze überschreitet, verringert sich die Reichweite durch die geringere Rückstreuung. Der Vergleich zum Inversionsfall kann angestellt werden. Bei größerem Erhebungswinkel steigt die Reichweite wieder an, bedingt durch das Überwiegen der geringer werdenden Extinktion gegenüber der kleineren Rückstreuung. Die schräge Normsicht V_S' , die sich aus diesem Reichweitenverlauf ergibt, ist je Erhebungswinkel für den Maßstab rechts dargestellt. Würde die Rauschgrenze U_R höher als $1 \cdot 10^{-13}$ rel. Einheiten angesetzt, wäre der Anstieg der schrägen Normsicht nicht mehr zu erkennen. Auch bei geringerer Normsicht ($V_N < 300$ m) ergibt sich bei 200 m Nebelschichtdicke keine Änderung der Reichweite R_R mit dem Winkel. Der Laserstrahl wird in der Nebelschicht stark abgeschwächt.

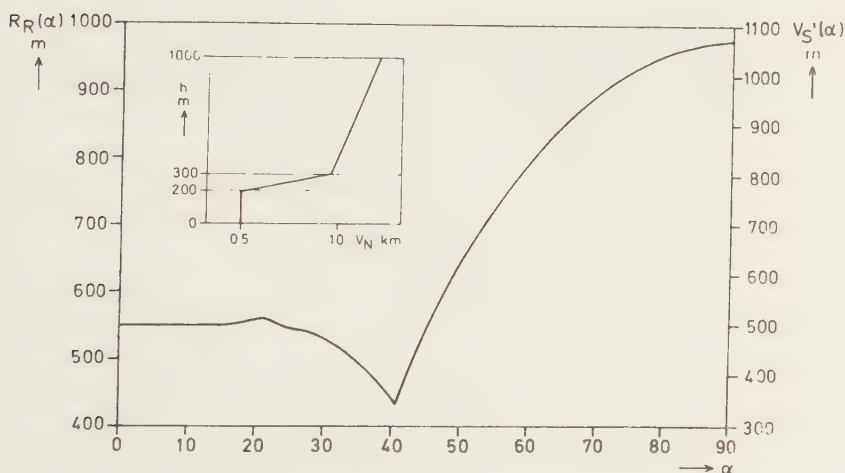


Abbildung 16: Berechnete Reichweite R_R in Abhängigkeit vom Meßwinkel für die eingezeichnete Schichtung (Nebel).

Eine Darstellung des Einflusses der Extinktion wird im Falle der Hochnebelschicht deutlich. Abbildung 17 zeigt diesen Fall. Die Reichweite R_R ist wieder in Abhängigkeit vom Erhebungswinkel α aufgetragen. Die ausgezogene Kurve gilt für die Rauschgrenze $U_R = 1 \cdot 10^{-13}$ rel. Einheiten. Der Verlauf der horizontalen Normsicht, der dieser Berechnung zugrunde liegt, ist rechts oben dargestellt. Homogene Sichtverhältnisse ($v_N = 2$ km) wurden für die untersten 100 m angenommen. Dann folgt die 300 m mächtige Hochnebelschicht mit Sichtweiten von 500 m bis 100 m abnehmend, darüber eine sprunghafte Verbesserung der Sicht auf 10 km. Die gestrichelte Kurve gibt die mit dem Wolkenhöhenmeßteil bestimmte Höhe bzw. Entfernung der Hochnebelschicht in Abhängigkeit vom Meßwinkel an.

Die bestimmte Reichweite R_R ist von 0 bis 4° konstant, trifft dann auf die Hochnebelschicht und fällt daraufhin mit zunehmendem Meßwinkel ab. Die sich ergebenden schrägen Normsichtweiten sind am rechten Maßstab abzulesen. Aus dem Vergleich der beiden Kurven erkennt man, daß die Schichten oberhalb der Hochnebelschicht nicht erreicht werden, der Laserstrahl wird zu stark abgeschwächt. Für diese Berechnungen wurden Mehrfachstreuungsprozesse ausgeschlossen. Für die Auswertung treten ähnliche Verhältnisse auf wie im Inversionsfall (Abb. 15). Man hat zur Unterscheidung beider Fälle die Angaben der Wolkenentfernung R_W und deren Verlauf. Aus der Differenz der Reichweite R_R und der Wolkenentfernung, die für die einzelnen Meßwinkel gemessen werden, läßt sich auf die Homogenität der Hochnebelschicht schließen.

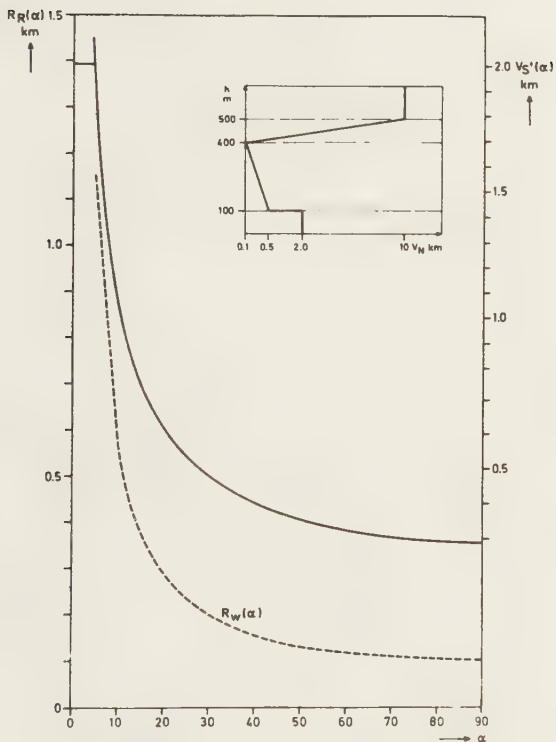
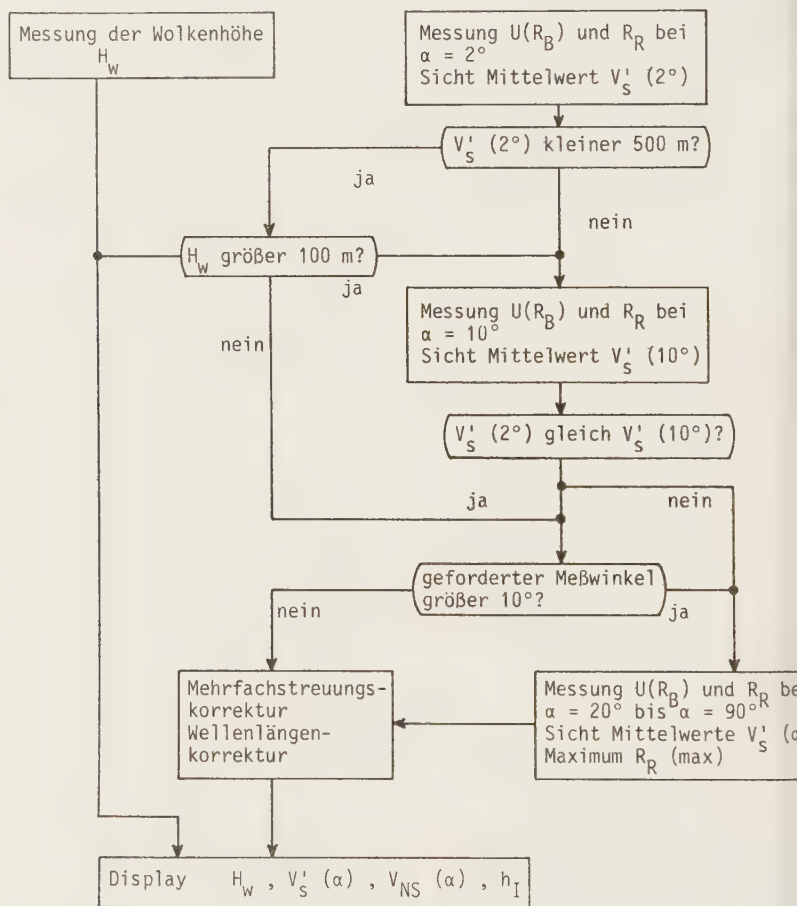


Abbildung 17: Berechnete Reichweite R_R in Abhängigkeit vom Meßwinkel für die eingezeichnete Schichtung (Hochnebel)

Die dargestellten Modellschichtungen zeigen die Grenzen des 2-Punkte-Verfahrens. Mit Zusatzmessungen unter weiteren Winkeln können Fehlinterpretationen eingegrenzt werden. Folgendes Meßschema läßt sich realisieren:



Im Normalfall wird die Messung unter zwei Winkeln ausgeführt, die Meßwerte werden gemittelt, die Sichtweiten V'_S (2°) und V'_S (10°) werden bestimmt und beide Werte werden verglichen. Ist man nicht an einer Bestimmung der Schichtung interessiert, reicht ein Wert V'_S (α) mit der entsprechenden Umrechnung

(Mehrfachstreuungskorrektur, Wellenlängenkorrektur, Bestimmung $V_{NS}(\alpha)$) aus zum Display. Will man eine Schichtung anzeigen, muß $V'_S(2^\circ)$ ungleich $V'_S(10^\circ)$ sein, man wird noch Messungen bis $\alpha = 90^\circ$ durchführen, ein Maximum von R_R bestimmen und die Inversionshöhe zusätzlich zum korrigierten Sichtweitenwert unter dem interessierenden Winkel anzeigen.

Die Angabe der wahren Schrägsichtweite für den Piloten hängt dann noch vom Luftlicht ab, die schließlich noch für die schräge Normsicht beim Endwert berücksichtigt werden muß.

Zur Erprobung des dargestellten 2-Punkt-Verfahrens wurde ein Laser-Radar-System benutzt, welches auch für Umweltschutzmessungen eingesetzt wurde [74]. Es stellt im Prinzip die Erweiterung eines Laser-Entfernungsmessers dar [53]. Die geforderte augensichere Laserwellenlänge konnte noch nicht benutzt werden. Für den Test der Methode ist dies aber von nachgeordneter Bedeutung.

4.1 Lidar System

Ein Lidar System besteht aus dem Laser Sender, dem Empfangsteleskop mit dem Detektor sowie der Datenerfassungsanlage [33, 30, 70]. Die Methode wurde unter Punkt 2.3 eingeführt. Abbildung 18 zeigt das Blockdiagramm des Lidars, Abbildung 19 zeigt eine Fotografie des Systems.

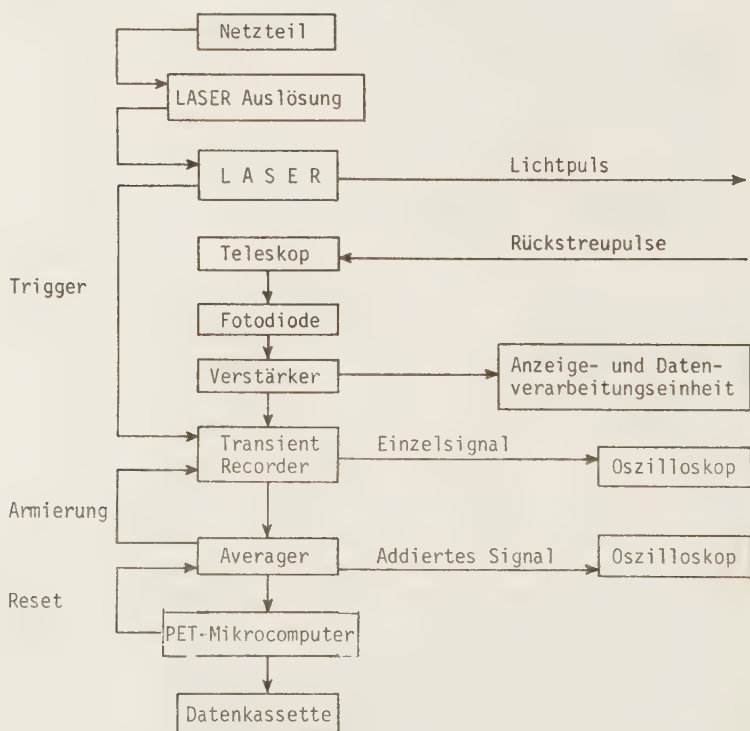


Abbildung 18: Blockdiagramm des Lidars

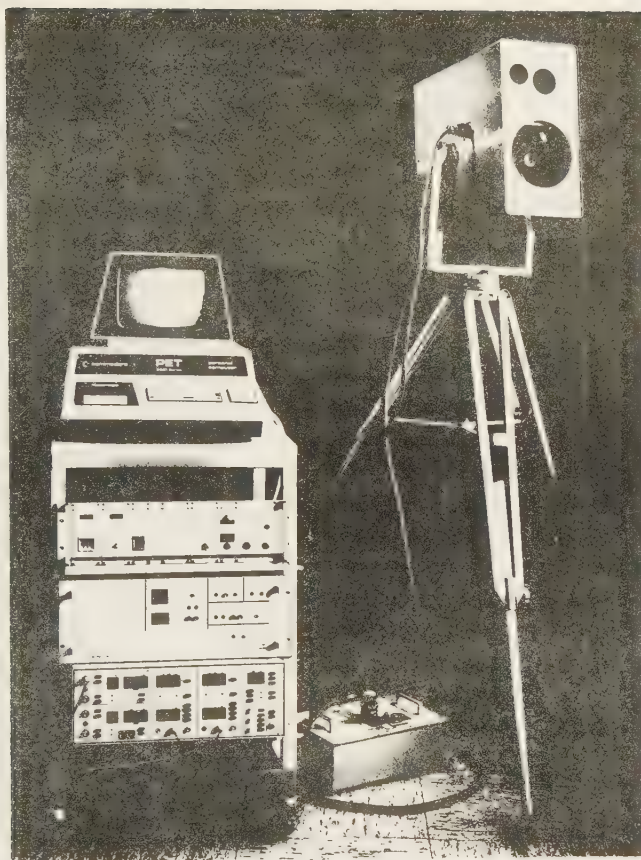


Abbildung 19: Prototyp eines Lidars für Schrägsicht- und Wolkenhöhenmessung im Einsatz

4.1.1 Laser

Es wurde ein Laser der Firma Zeiss benutzt. Die Spannungsversorgung besteht aus wartungsfreien Bleiakkus und der notwendigen Elektronik. Das Laser Medium ist ein Neodymglas-Stab. Die Güteschaltung wird mit einem rotierenden Prisma bewerkstelligt, das nach Auslösung innerhalb einer Zeit kleiner als 100 ms die erforderliche Drehzahl erreicht.

Tabelle 4 enthält die technischen Daten des Lasers nach Herstellerangaben.

Tabelle 4: Technische Daten des Zeiss Lasers

Elektrische Versorgung	eingebauter Batteriesatz, 4 Stück (Typ 3 F x 4 S, 6V/6AH) oder extern
Wellenlänge	1064 nm
Ausgangsleistung	ca. 3 MW
Ausgangsenergie	ca. 150 mJ
Strahldivergenz	ca. 2,5 mrad
Pulsdauer (Halbwert)	< 50 ns
max. Schußfolge	1 Hz (intermittierend)
max. Dauerschußfolge	0,3 Hz
Schüsse pro Batterieladung	4.000

Mittels einer Umlenkeinheit wird der vom Laser ausgehende Strahl aufgeteilt, so daß zur Messung 99,9 % der Strahlung zur Verfügung stehen. 0,1 % benötigt die Auswerteelektronik zur Erzeugung des Trigger-Signals und zur Messung der Ausgangsenergie. Abb. 20 zeigt die Umlenkeinheit. Sie ist in einer Metallhalterung der Länge nach verschiebbar untergebracht. Das Rohr selbst ist am Laserkopf drehbar gelagert. Die winkelmäßige Justierung der gesamten Umlenkeinheit ist durch Konterschrauben gewährleistet. Hinter dem 99,9 %igen Umlenspiegel ist vor dem Lichtleiterhalter eine Optik zur Bündelung des Restlichts untergebracht.



Abbildung 20: Umlenkeinheit

Dieses Restlicht wird zur Energiemessung des austretenden Laserstrahls benutzt. Das Prinzip der Messung ist eingehend beschrieben worden [33, 70]. Das Restlicht wird über ein 15 cm langes Lichtleiterkabel einer Fotodiode vom Typ UDT PIN 8 LC zugeführt. Durch die optische Kopplung wird eine bessere Abschirmung vor Einstreuungen von Laser-Zündimpulsen auf die nachfolgende Elektronik erreicht. Der Spannungspuls der Diode wird einmal zum Triggern der Datenverarbeitung benutzt, zum anderen wird der Puls integriert, verstärkt und einem Memory Voltmeter zugeführt. Das Voltmeter ist geeicht, so daß die Energie direkt angezeigt wird.

4.1.2 Empfängerteleskop

Abbildung 21 zeigt die Empfangsoptik [53]. Das Teleskop, ein an der Vorderseite mit Aluminium beschichteter, sphärischer Hohlspiegel mit 100 ± 5 mm Brennweite, hat einen Durchmesser D_T von 134 mm. Eine durch die Fokussieroptik hervorgerufene Abschattung begrenzt die effektive Empfängerfläche $\bar{e}$ auf

$$\bar{e} = \frac{D_T^2 - D_2^2}{4} \cdot \pi.$$

D_T ist der Durchmesser des Spiegels, D_2 der Durchmesser der Fokussieroptik, $\bar{e}$ beträgt 130 cm^2 .

In der Brennebene des Spiegels ist der Platz der Sichtfeldblende. Sie ist in Abbildung 21 mit der Ziffer 2 belegt. Der Tangens des halben Sichtfeldwinkels γ_T berechnet sich nach der Beziehung

$$\tan \gamma_T = \text{Blendenradius} / \text{Brennweite}$$

und wird in mrad angegeben. Für die meist benutzten Sichtfeldwinkel $2 \gamma_T$ von 8 mrad oder 27.502 Winkelminuten wurde ein Blendendurchmesser von 0,8 m berechnet.

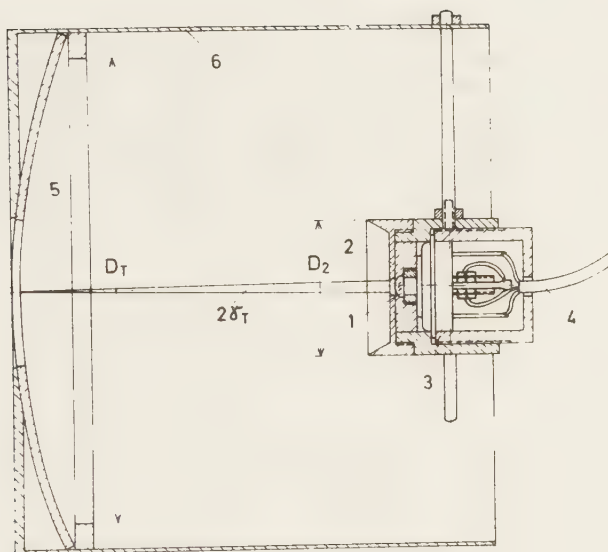


Abbildung 21: Empfangsoptik

- 6 Tubus
- 5 Spiegel
- 4 Kabelführung
- 3 Fotodiode YAG 444
- 2 Blende
- 1 Feldlinse

Eine Fokussieroptik war gedacht für den möglichen Einsatz von Interferenzfiltern zur Blockung des Hintergrundlichts vor der Fotodiode. Dies konnte entfallen durch das Überwiegen des thermischen Rauschens über das Hintergrundrauschen bei der Fotodiode (siehe Punkt 4.3). Eine Feldlinse (Ziffer 1 in Abbildung 21) wird benutzt, um das Bild des Zieles auf der Fotodiode abzubilden.

Die durch die Öffnungswinkel von Laser $2\gamma_L$ und Teleskop $2\gamma_T$ gegebenen parallelen Strahlenbündel berühren sich ab einer gewissen Entfernung R_0 . Das Meßvolumen beginnt bei dieser Entfernung. Abbildung 22 zeigt das Prinzip. Bis zur völligen Überlappung der Strahlen ($\gamma_L \neq \gamma_T$) muß eine Korrekturfunktion $\zeta(R)$ gefunden werden. Für die gegebenen Öffnungswinkel des Lasers $2\gamma_L$ und des Teleskops $2\gamma_T$, sowie bei gegebenem Abstand AB der Systeme erhält man für die Fläche der Kreissegmente f:

$$f = \frac{D_T^2}{8} \left(\frac{\pi}{180^\circ} \frac{\delta_T}{2} - \sin \frac{\delta_T}{2} \right) + \frac{D_L^2}{8} \left(\frac{\pi}{180^\circ} \frac{\delta_L}{2} - \sin \frac{\delta_L}{2} \right) \quad (54)$$

Die Winkel $\frac{\delta_T}{2}$ und $\frac{\delta_L}{2}$ errechnen sich aus

$$\sin \frac{\delta_T}{2} = \frac{a}{\frac{D_T}{2}}; \quad \sin \frac{\delta_L}{2} = \frac{a}{\frac{D_L}{2}}$$

mit

$$a = \sqrt{\frac{D_T^2}{4} - \frac{\left(\frac{D_T^2}{4} - \frac{D_L^2}{4} + AB^2 \right)^2}{4 AB^2}}$$

$$\frac{D_T}{2} = R \cdot \operatorname{tg} \gamma_T$$

$$\frac{D_L}{2} = R \cdot \operatorname{tg} \gamma_L$$

Damit ist mit den Maßen des Systems $2\gamma_T = 8 \text{ mrad}$, $2\gamma_L = 6 \text{ mrad}$ und $AB = 0.273 \text{ m}$ die Überlappungsfunktion $\zeta(R)$ zu berechnen. Die Überlappung ist nach 200 m Entfernung vollkommen.

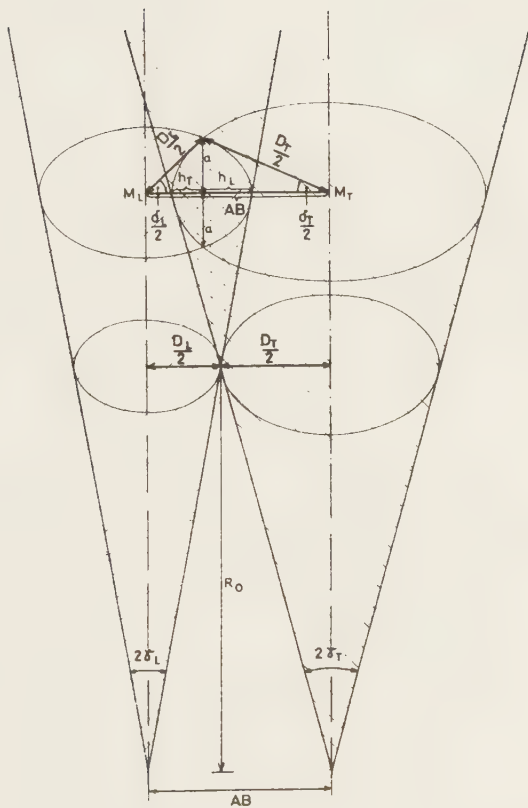


Abbildung 22: Geometrie der Öffnungswinkel von Laser (Index L) und Teleskop (Index T) im Überlappungsbereich

4.1.3 Fotodiode

Da die Fotodiode im Wellenlängenbereich von 1064 nm eine höhere Quantenausbeute besitzt als beispielsweise die Fotokathode eines Fotomultipliers, wird als Detektor eine Diode vom Typ YAG 444 verwendet, den die Firma EG & G speziell für den Einsatz von Nd-Lasern entwickelt hat. Abbildung 23 zeigt die Empfindlichkeitscharakteristik.

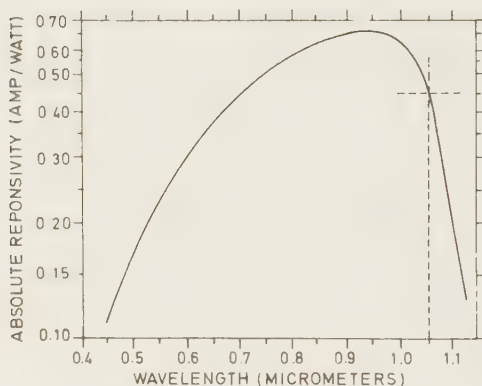


Abbildung 23: Charakteristik der Empfangsdiode

Die Quantenausbeute für gepulste Strahlung beträgt bei 1060 nm bei 20 ns Pulsdauer mehr als 38 %. Die Anstiegszeit beträgt 8 ns, die Abfallzeit 10 ns.

4.1.4 Mechanischer Aufbau des Systems

Um den Anforderungen der Aufgabenstellung genügen zu können, wurde eine Lösung angestrebt, bei der kompakte Bauweise, gute Transportierbarkeit und leichte Zugänglichkeit zum Justieren verwirklicht sind [53].

Abbildung 24 zeigt den mechanischen Aufbau des Lidar Systems. Die Gehäuseabdeckungen sind gegenüber der Abbildung 19 entfernt. Der Laser ist über eine Aufhängung fest mit dem tragenden Rahmen verschraubt. Die Umlenkeinheit hat über einen Justiertisch nur mit dem Laser Verbindung. Hierdurch soll der Einfluß einer möglichen, temperaturbedingten Änderung des Rahmens vermindert werden. Auf der anderen Seite des Rahmens ist das Teleskop mit dem Tubus und der Fotodiode angeschraubt. Im Gehäuseteil sind ebenfalls die Lagerungen für die Stativgabel befestigt. In montiertem Zustand sind die Gehäuseabdeckungen durch Lösen einiger Blechschrauben leicht abnehmbar, wie dies für Abbildung 24 geschehen ist, und das Innere des Gerätes ist zur Justierung ohne große Verzögerung zugänglich.

Wegen der durch die Umlenkeinheit vorgegebenen und senkrecht zur Laserachse stehenden optischen Achse des Senders muß der Laser senkrecht zur Meßachse justierbar montiert sein. Aus diesem Grund wird der Laser mit zwei senkrecht zur optischen Achse beweglichen Lagerböcken auf den aus Vierkantprofil geschweißten Stahlrahmen geschraubt. Durch die Lagerböcke ist die Laserachse in kleinen Winkelbereichen (maximal 1 min) um sich selbst drehbar. Außerdem ist es möglich, die Laserachse leicht anzuheben bzw. abzusenken. Die untere Laserhalterung ist ein einfaches Winkelblech, dessen Abstand zum Stahlrahmen mit Schrauben und Druckfedern gesichert ist, und mit dem die eingestellte Justierung fixiert wird.

Abbildung 19 zeigt den geschlossenen Meßkopf von vorn. Die drei Öffnungen im Lidar-Gehäuse sind: Die große Öffnung ist für das Teleskop, die rechte kleine Öffnung für den Laserstrahl und die linke kleine Öffnung ist für ein Zielfernrohr vorgesehen.

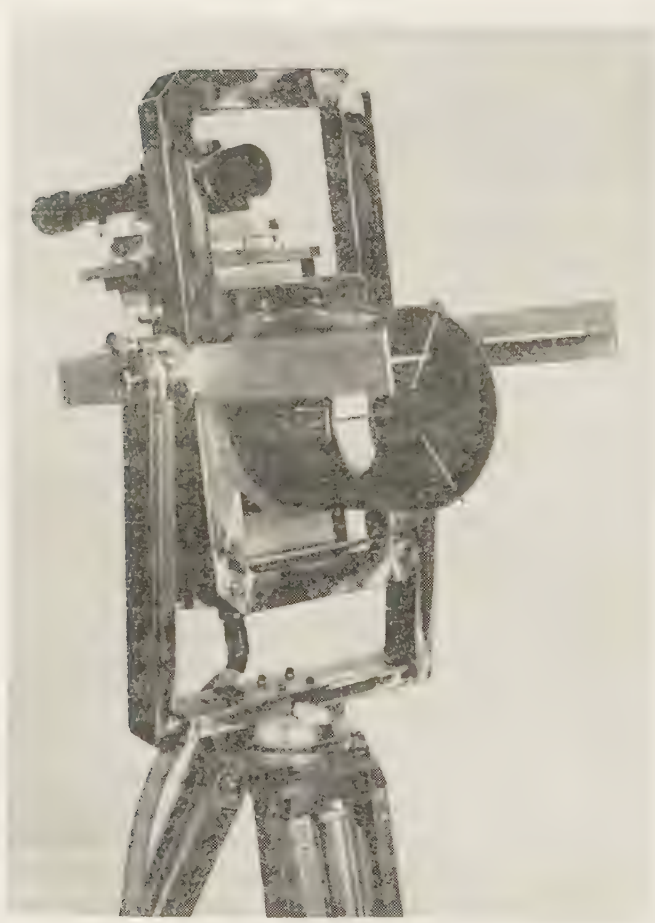


Abbildung 24: Foto des mechanischen Aufbaus des Lidar Systems

4.2 Datenerfassungssystem

Die für die Auswertung der empfangenen Signale notwendige Datenerfassungsanlage besteht bei dieser Testversion noch aus zwei Teilen: Zur Prüfung des 2-Punkt-Verfahrens mit der universellen Slope Methode ist ein schneller Analog-Digital-Wandler mit Speicher (Biomation Transient Digitizer 8100), ein Mittelwertbildner (FB Elektronik) und ein Tischrechner (Commodore PET 2001) erforderlich. Abbildung 18 zeigt den Laufplan. Die Lidar Signale werden gespeichert, über die notwendig erachtete Schußzahl gemittelt und vom Operateur abrufbar dem Rechner zur Verfügung gestellt.

Parallel dazu ist das für das 2-Punkt-Verfahren erforderliche Datenpaket angeordnet. Es wird der gleiche Tischrechner als Kontroll- und Auswerteeinheit benutzt.

4.2.1 Lidar Datenerfassung

Der zur Aufnahme des Laser-Echo-Signals herangezogene Transient Digitizer verfügt über einen schnellen Echtzeit-A/D-Wandler, der eine maximale Auflösung der Zeitachse in 10 ns Intervallen ermöglicht. Dies entspricht einer maximalen Entfernungsauflösung von 1.5 m. Die digitalisierten Werte der analogen Eingangsfunktion werden einem Hauptspeicher zugeführt, der 2048 8-Bit-Worte aufnehmen kann. Die höchstmögliche Empfindlichkeit der Eingangsverstärker liegt bei 50 mV. Es besteht die Möglichkeit, diese Information wortseriell mittels eines digital arbeitenden Abfragegerätes in andere Datenverarbeitungslagen zu transferieren [74].

Eine Begrenzung des Systems ist durch die zwar hohe, jedoch in vielen Fällen nicht ausreichende Eingangsempfindlichkeit des Transient Digitizers und durch die 8-Bit-Auflösung gegeben. Es besteht nun eine mathematisch technische Möglichkeit, die Auflösung zu verbessern: die Anwendung der Mittelwertbildung. Die Rauschanteile, die dem Nutzsignal überlagert sind (siehe Punkt 4.3), treten in Frequenz, Phase und Amplitude vorwiegend statistisch auf. Das Nutzsignal zeigt hingegen quasi-statischen Charakter, wenn man die Betrachtung in einen kleinen Zeitbereich verlegt. Hieraus folgte die Überlegung, mehrere Messungen des gleichen Nutzsignals noch einmal vorzunehmen und diese additiv zu überlagern. Aufgrund der Rauschverteilung besteht die große Wahrscheinlichkeit, daß sich viele Rauschanteile zum Wert Null addieren, während das Nutzsignal ständig aus dem Rauschen herauswächst. Das Gerät, das diese Funktion übernimmt, ist ein schneller Mittelwertbildner. Es besteht im wesentlichen aus einem

Addierwerk, einem möglichst großen Rechenpeicher und einer sehr schnellen Operationselektronik, die es ermöglicht, bis zu 500 Additionen von 2048 8-Bit-Worten pro Sekunde durchzuführen. Praktisch gesehen bedeutet dieser Wert, daß der Transient Digitizer 500 Messungen pro Sekunde ausführen darf. Der Additionsspeicher des Mittelwertbildners verfügt über eine Rechenkapazität von 16 Bit/Wort; dieses entspricht einem Zahlenbereich von 0 bis 65535. Nach Beendigung der Aufzeichnung können die Summenwerte wortseriell einem Computer zugeführt werden. Dies geschieht im Handshake-Verfahren über eine genormte Schnittstelle (IEEE 488-Bus). Der eingesetzte Computer ist ein PET 2001. Die erforderliche Auswertesoftware ist auf Kassette abgelegt (Punkt 4.5.1). Sämtliche Bedienungsfunktionen des Mittelwertbildners lassen sich über die Computertastatur fernsteuern. Das Programm ist derart ausgelegt, daß der Anwender in der Lage ist, in kürzester Zeit aus den vom Mittelwertbildner übermittelten Werten nach Eingabe aller Lidar System Parameter fertig errechnete Rückstreuwerte in Abhängigkeit von der Meßentfernung auf dem zum PET 2001 gehörenden Bildschirm ablesen zu können. Der Rechner übernimmt natürlich auch die Aufgabe, aus den Summenwerten des Mittelwertbildners den echten Mittelwert durch Division mit der Meßzyklenanzahl zu ermitteln. Einmal eingelesene Werte können beliebig oft in frei wählbaren Entfernungsbereichen untersucht werden.

Für die Archivierung aufgezeichneter Daten empfiehlt sich der Einsatz eines Druckers. Dadurch wird auch der Nachteil der Monitor-Wiedergabe beseitigt, die aufgrund der Bildschirmgröße nur 25 Datenzahlen mit 40 Charaktern darstellen kann. Die Ablegung auf Datenkassette zur späteren Nachberechnung ist möglich.

4.2.2 Datenerfassung für das 2-Punkt-Verfahren

Abbildung 25 zeigt das Blockschaltbild für die Signalverarbeitung nach dem 2-Punkt-Verfahren. Das Signal vom Empfänger wird zur Bestimmung der Rauschentfernung R_R auf einen Verstärker (Verst. 2) gegeben, dessen Charakteristik es sein soll, das Erreichen der Rauschspannung definitiv meßbar anzugeben und als Stop-Signal auf einen Zähler zu geben, der mit dem Trigger-Puls vom Laser-Ausgang gestartet wurde (Punkt 4.1.1).

Zur Bestimmung des Spannungswertes $U(R_B)$ wird das Signal parallel dazu auf einen A/D-Wandler gegeben, wobei mittels Zeitschalter eine Zeit t_B gewählt wird, die der Entfernung R_B entspricht. Bei dieser Entfernung wird $U(R_B)$ abgespeichert.

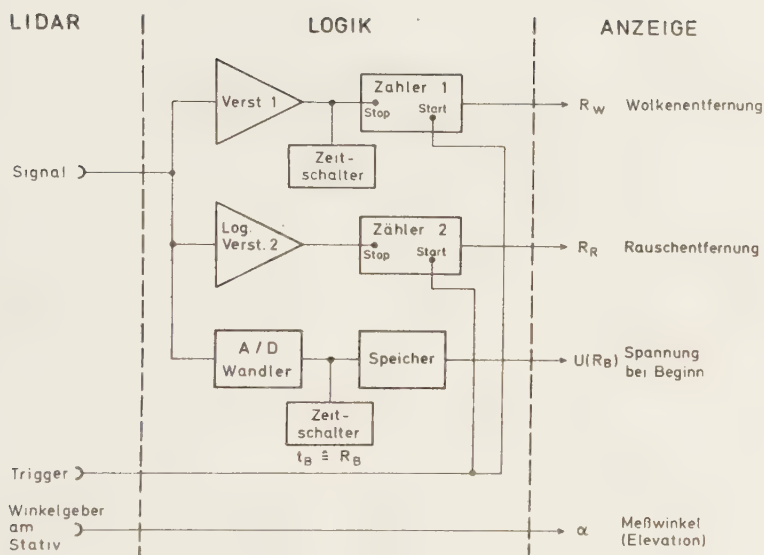


Abbildung 25: Blockschaltbild der Signalverarbeitung für das 2-Punkt-Verfahren

4.3 Signalrauschen

Auf das Signalrauschen wurde unter Punkt 2.4.3 bereits kurz eingegangen. Gleichung 29 zeigt die Rauschspannung U_R [44]:

$$U_R = R_a i_a = R_a \sqrt{i_{HR}^2 + i_{DR}^2 + i_{RR}^2} \quad (29)$$

Dabei bedeuten:

i_{HR} = der Rauschstrom, der durch das Hintergrundlicht erzeugt wird. Am Tage ist dies das Himmelslicht, bei Nacht mögliches Mond- oder Sternenlicht.

i_{DR} = Dunkelstrom der Diode,

i_{RR} = Wärmerausstrom des Innenwiderstandes R_{innen} des Detektorsystems.

Wenn Δf die Bandbreite des Systems ist, so erhält man für die einzelnen Anteile folgende Ausdrücke:

$$i_{HR} = v_i \sqrt{2e \varnothing_{eH} S_k \Delta f}$$

$$i_{DR} = \sqrt{2 e J_D \Delta f}$$

$$i_{RR} = \sqrt{4 k T_k \Delta f / R_{innen}}$$

Dabei bedeuten:

S_k = die Empfindlichkeit in A/W,

v_i = die Stromverstärkung,

$\varnothing_{eH}$ = die auf den Empfänger gelangende Sekundärstrahlungsleistung durch den Hintergrund (Wert am Tag ungefähr $10^{-10} W$),

k = die Boltzmannkonstante,

T_k = die absolute Temperatur,

e = die Elementarladung und

J_D = den Dunkelstrom am Detektor.

Für U_R ergibt sich dann:

$$U_R = R_a \sqrt{\Delta f} \sqrt{v_i^2 \cdot 2 e \varnothing_{eH} \cdot S_k + 2 e J_D + \frac{4 k T_k}{R_{innen}}}$$

4.4 Logarithmischer Verstärker

Logarithmische Verstärker werden benutzt, wenn man eine große Signaldynamik erfassen will. Dies ist bei Lidar Messungen wegen der $1/R^2$ -Abhängigkeit der Fall. Abbildung 10 zeigt in der oberen Darstellung das Signal mit linearer Verstärkung, darunter mit logarithmischer Verstärkung.

Die Benutzung des logarithmischen Verstärkers mit Verstärkung sowohl positiver als auch negativer Signalspannungen bietet die Möglichkeit, das Erreichen des Rauschwertes U_R als Nulldurchgang kenntlich zu machen. Der Verstärker 2 im Blockschaltbild der Abbildung 25 ist zum Beispiel ein logarithmischer Verstärker.

Ein Verstärker dieser Art (American Astrionics Log Video Amplifier ABL 8040) wurde getestet. Die Charakteristik des Verstärkers ist bei einer bekannten Eingangsspannung U_{Eingang} :

$$U_{\text{Ausgang}} = \text{Verstärkung} \times \log(U_{\text{Eingang}})$$

Die Anwendung des logarithmischen Verstärkers für Lidar Messungen ist auf Detektoren begrenzt, die nicht vom Hintergrundrauschen beeinflusst werden. Bei Vorhandensein von Hintergrundrauschen, wie es bei Benutzung des Fotomultipliers der Fall ist, wird die Eingangssignaldynamik komprimiert mit dem jeweiligen, stark schwankenden Rauschsignal als Ausgangsspannung angezeigt. Die Anwendung ist daher für Absolutmessungen der Signalstärke nicht geeignet. Für die hier benutzte Fotodiode mit thermischer Rauschbegrenzung gibt sich die Möglichkeit, die geringen Unterschiede beim Erreichen der Rauschgrenze durch die gleich starke Verstärkung in positive wie negative Richtung des Verstärkers zur Hervorhebung auszunutzen. Der Nulldurchgang erzeugt an einem nachfolgenden Diskriminator den Stop-Impuls für die Bestimmung der Reichweite R_R (Abbildung 25).

Nachdem bisher im wesentlichen nur die Signalaufnahme beschrieben wurde, wird in diesem Kapitel die Bestimmung der Sichtweite aus dem Signal behandelt.

4.5.1

Bestimmung mittels Slope Methode

Unter Kapitel 4.2.1 wurde die Speicherung des Lidar Signals beschrieben. Dieses Signal wird per Rechnerprogramm (Commodore Basic) weiterverarbeitet. Ein Speicherelement im Transient Digitizer kann als Meßwert höchstens 8 bit auflösen; d.h., es werden nur Zahlen von 0 bis 256 in den Speicher geladen. Diese 8 bit werden einer Spannung zugeordnet, die durch den Meßbereich am Transient Digitizer eingestellt wird (Zuordnung als Wert IR im Rechenprogramm mit der Einheit Volt). Alle Werte größer als der Meßbereich bekommen den Wert 256 zugeordnet. Da der Meßbereich für positive und negative Spannungen gilt, bekommt der Nullpunkt den Wert 128 zugeordnet. Wenn für eine Messung eine symmetrische Lage des Nullpunkts nicht erforderlich ist, gibt sich die Möglichkeit, den Nullpunkt mittels des sogenannten Offset-Wahlschalters beliebig zwischen 0 und 256 einzustellen. Da in unserem Fall nur positive Spannungen vom Verstärker an den Transient Digitizer geliefert werden, bietet sich zur vollen Ausnutzung des Speicherbereichs an, den Nullpunkt auf den Wert 0 zu legen. Um ein mögliches Überspringen bei Überlastung des Verstärkers erkennen zu können, sollten aber einige negative Spannungen zur Identifizierung dieser Fälle angezeigt werden können. Der Nullpunkt wird damit auf den Wert 25 eingestellt, was für den Offset-Wahlschalter den Wert - 0.8 bedeutet. Die Transient Digitizer haben nun die störende Eigenschaft, daß der Nullpunkt um einige Werte schwanken kann. Dadurch wird es für die Auswertung nötig, die genaue Lage des Nullpunkts zu bestimmen. Dies kann beim Lidar Signal anhand des Signals erfolgen; es wird dazu das Meßsignal aus einer Entfernung von 1,5 km und größer herangezogen. Voraussetzung hierfür ist, daß kein Wolkensignal sich an dieser Stelle befindet. Da das Meßsignal in dieser Entfernung stark verrauscht ist, müssen einige Meßwerte gemittelt werden. Diese Nullpunktbestimmung wird als Rausch- und Offsetkorrektur (Wert KC) vor Beginn der Auswertung durchgeführt.

Der Rechner bestimmt die Signalspannung $U(R)$ aus den im Mittelwertbildner gespeicherten digitalen Werten (C) dividiert durch die Zahl der Mittelbildungen (N)

durch Korrektur des Nullpunktes (KC) bei eingestellter Auflösung (Meßbereich IR dividiert durch 128) zu:

$$U(R) = \frac{IR}{128} \left(\frac{C}{N} - KC \right)$$

Als Beispiel sei

KC	=	25,
IR	=	1 Volt,
N	=	1 und
C	=	153.

Damit wird die Meßspannung 1 Volt berechnet.

Aus dem Meßwert $U(R)$ wird mit der Entfernung R und dem Systemparameter K (nach Gl. (22) und (25)) per Rechner die Lidar Signature $S(R)$ berechnet.

Abbildung 7 zeigt einen möglichen Verlauf.

Zur Ermittlung der Schrägsichtweite aus dem Verlauf der Werte $S(R)$ wird die Methode der kleinsten Quadrate zur Bestimmung der Neigung c_1 der in Abbildung 7 gestrichelt gezeichneten Geraden benutzt. Geht man damit in Gl. (28) ein, erhält man

$$V'_S(\alpha) = -7.824/c_1, \text{ die schräge Normsichtweite in Meßrichtung.}$$

4.5.2 Bestimmung mittels 2-Punkt-Verfahren

Die Bestimmung der Schrägsichtweite nach dem 2-Punkt-Verfahren läßt sich direkt nach Gl. (36) mit den im Rechner vorhandenen Werten R_R , R_B , $U(R_R)$, $U(R_B)$ oder in Rechnerschreibweise

$$\begin{aligned} RR &= R_R, \\ RB &= R_B, \\ UR &= U(R_R), \\ UB &= U(R_B) \end{aligned}$$

berechnen zu

$$V'_S(\alpha) = \frac{7.824 \cdot (RR - RB)}{\ln(UB \cdot RB^2) - \ln(UR \cdot RR^2)}.$$

In den vorangegangenen beiden Kapiteln wurde beschrieben, wie aus dem Lidar Signal die Sichtweite ermittelt werden kann. Für die Slope-Methode ist es nötig, die Steigung einer Kurve zu bestimmen. Es sei für die Fehlerbetrachtung angenommen, daß die Atmosphäre homogen geschichtet ist [44]. Dann kann die Steigung der Kurve nach der 2-Punkt-Methode bestimmt werden. Es werden die Bezeichnungen des 2-Punkt-Verfahrens benutzt:

$$V'_S(\alpha) = \frac{7.824 (RR - RB)}{\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2}}$$

Den absoluten Fehler $\Delta V'_S$ der Sichtweite V'_S in Abhängigkeit von den Meßfehlern ΔUB , ΔUR , ΔRB und ΔRR erhält man zu:

$$\Delta V'_S = \left| \frac{\partial V'_S}{\partial UB} \right| \Delta UB + \left| \frac{\partial V'_S}{\partial UR} \right| \Delta UR + \left| \frac{\partial V'_S}{\partial RB} \right| \Delta RB + \left| \frac{\partial V'_S}{\partial RR} \right| \Delta RR$$

mit

$$\left| \frac{\partial V'_S}{\partial UB} \right| = \left| \frac{7,824 \cdot (RR - RB)}{UB \left(\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2} \right)^2} \right| ,$$

$$\left| \frac{\partial V'_S}{\partial UR} \right| = \left| \frac{7,824 \cdot (RR - RB)}{UR \left(\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2} \right)^2} \right| ,$$

$$\left| \frac{\partial V'_S}{\partial RB} \right| = \left| 7,824 \frac{\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2} + 2 (RR - RB) \frac{1}{RB}}{\left(\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2} \right)^2} \right| ,$$

$$\left| \frac{\partial V'_S}{\partial RR} \right| = \left| 7,824 \frac{\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2} + 2 (RR - RB) \frac{1}{RR}}{\left(\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2} \right)^2} \right|$$

Für den relativen Sichtweitenfehler ergibt sich dann:

$$\frac{\Delta V'_S}{V'_S} = \frac{1}{\ln \frac{UB \cdot RB^2}{UR \cdot RR^2}} \left(\frac{\Delta UB}{UB} + \frac{\Delta UR}{UR} + 2 \frac{\Delta RB}{RB} + 2 \frac{\Delta RR}{RR} \right) +$$

$$+ \frac{RB}{RR - RB} \frac{\Delta RB}{RB} + \frac{RR}{RR - RB} \frac{\Delta RR}{RR}$$

Nimmt man folgende Meßfehler an

$$\frac{\Delta UB}{UB} = 0,01, \quad \frac{\Delta UR}{UR} = 0,02, \quad \frac{\Delta RR}{RR} = 0,05 = \frac{\Delta RB}{RB},$$

so kann man bei einer Sichtweite V'_S von 1000 m und den Meßentfernungen $RB = 50$ m und $RR = 200$ m auf einen relativen Sichtweitenfehler von 0,26 kommen [Der Faktor $\ln (UB \cdot RB^2 / UR \cdot RR^2)$ wurde umgeformt in $7,824 (RR - RB) / V'_S$!]. Bei abnehmender Sichtweite wird der Fehler kleiner. Bei einer Sichtweite von 200 m ergäbe sich, alle anderen Parameter gleich gelassen, ein Fehler von 0,12.

Man sieht, daß die mit diesem Auswerteverfahren zu erreichende Genauigkeit abhängig ist von der Meßbasis $(RR - RB)$, wie dies auch von den Transmissometern her bekannt ist.

Das Meßgerät wurde in den Jahren 1978 und 1979 bei mehreren Einsätzen zur Bestimmung der Schnrägsichtweite verwandt. Nach einer allgemeinen Testreihe des Verfahrens bei homogener Schichtung konnte das Gerät bei einer Meßkampagne im Frühjahr 1979 über einen längeren Zeitraum eingesetzt werden. Hierbei wurde der Vergleich der Slope-Methode mit dem 2-Punkt-Verfahren durchgeführt. Als Sonderfall wird eine Messung bei Inversionslage dargestellt.

5.1 Meßbeispiel bei homogener Schichtung

Abbildung 26 zeigt den vertikalen Verlauf der Werte βr^2 gemessen am 21.6.1978. Meßwerte von 5 Messungen gemittelt über jeweils 10 Laserechos (im Abstand von 5 Sekunden) sind aufgetragen. Aus der gestrichelt dargestellten Mittelkurve läßt sich die Steigung bestimmen. Man erhält daraufhin mittels der Slope-Methode die Sichtweite $V'_S(0^\circ) = 6 \text{ km}$.

Das 2-Punkt-Verfahren ergab für die Reichweite R_R folgende 10 Einzelwerte:

925 m	948 m
1063 m	894 m
897 m	975 m
942 m	960 m
933 m	960 m

Mit den bekannten Werten $U(R_R) = 0,005 \text{ V}$ und $R_B = 250 \text{ m}$ sowie mit den gemittelten Meßwerten $U(R_B) = 0,17 \text{ V}$ erhält man damit eine Sichtweite $V'_S(0^\circ)$ von 6,4 km.

Die Abweichung der mit den beiden Methoden bestimmten Sichtweiten von 0,4 km liegt innerhalb der Fehlergrenzen (Punkt 4.6).

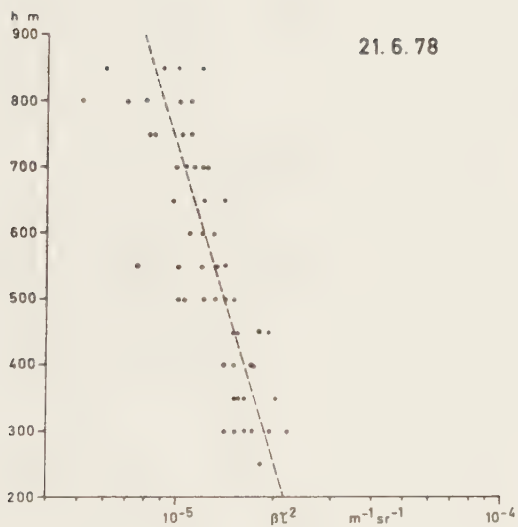


Abbildung 26: Vertikaler Verlauf der gemessenen Lidar Signale $\beta \tau^2$
vom 21.6.1978; gestrichelt die mögliche Slope-Funktion

5.2 Ergebnisse einer Meßkampagne

Die Meßkampagne zum Test des 2-Punkt-Verfahrens wurde im Frühjahr 1979 in Oberpfaffenhofen durchgeführt [77]. Mit dem in Punkt 4 beschriebenen System wurde der Signalverlauf, das Anfangssignal UB und die Reichweite RR in Abhängigkeit vom Meßwinkel gemessen.

Meßwerte aus je 10 Einzelsignalen wurden mit dem zum System gehörenden Rechner weiterverarbeitet. Somit konnte das 2-Punkt-Verfahren mit der Slope-Methode verglichen werden. Zur Kontrolle wurde der Normsichtwert gemessen mit dem Streulichtschreiber am Boden, herangezogen.

5.2.1 Beispiel einer homogen geschichteten Atmosphäre

Das Beispiel der Auswertung vom 18.6.1979 zeigt die homogene Schichtung. Tabelle 5 gibt die Informationen zu den Meßwerten A4 im Auswertebereich von 370 m bis 980 m. Die Sichtweite wurde zu 6.2 km berechnet. Am Meßtag regnete es leicht, die Sichtweite am Streulichtschreiber war - umgerechnet auf 1.06 μm - 6 km. Aus der Reichweitenmethode ergab sich ein Sichtweitenwert von 6.1 km. Dieser Wert ist in Abbildung 28 mit einem Quadrat als Symbol eingezeichnet.

Tabelle 5: Computerausdruck der Meßwerte vom 18.6.1979

INFORMATIONSDATEN ZU DEN MESSWERTEN R4

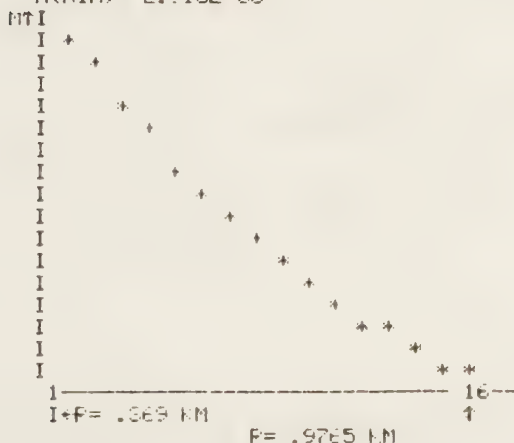
DATUM : 18.6.79
 UHRZEIT : 8 UHR 30
 WINKEL : ,3 GRAD
 MESSBEREICH : .369 KM BIS .9765 KM

ES WURDEN 16 MESSWERTE JEWEILS IM
 ABSTAND VON .0405 KM GESPEICHERT.
 (EIN MESSWERT IST JEWEILS MITTELUNG
 AUS 27 WERTEN.)

DIAGRAMM: M(LUR)+R4,R,K GEGEN P

M(MAX)= 6.108E-06

M(MIN)= 3.915E-06



5.2.2 Beispiel einer Inhomogenität

Tabelle 6 zeigt das Meßbeispiel C7 vom gleichen Tag 18.6.1979, 15.50 MEZ aufgenommen. Eine Inhomogenität in etwa 600 m Entfernung ist an der Computerdarstellung des Verlaufs der Rückstreuwerte deutlich.

Aus dem Verlauf der Signale, die in Abbildung 27 dargestellt sind, ist kaum eine Störung zu erkennen. Abbildung 27 zeigt den Signalverlauf für eine Einzelmessung (oben) und die über 10 Einzelmessungen gemittelte Signalspannung (unten). Die Störung der Homogenität ist durch einen Pfeil gekennzeichnet, sie ist in Tabelle 6 hervorgehoben.

Eine Berechnung der Normsicht nach der Slope-Methode ergab 8,5 km Sicht. Das 2-Punkte-Verfahren zeigte 6,5 km an. Der Vergleich der mit den beiden Methoden bestimmten Sichtweiten ist in Abbildung 28 mit einem Kreis als Symbol gekennzeichnet.

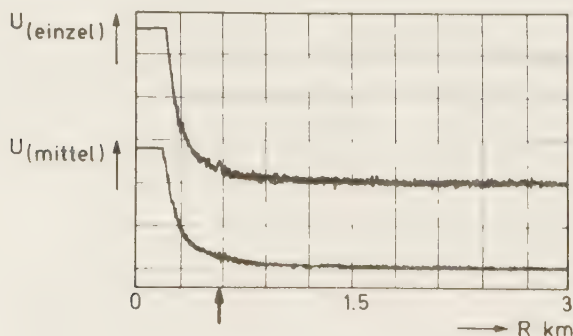


Abbildung 27: Signalverlauf der Messung vom 18.6.1979, 15.50 MEZ für ein Einzelsignal (oben) und für das über 10 Einzelsignale gemittelte Signal (unten). Der Pfeil kennzeichnet den Ort der Inhomogenität.

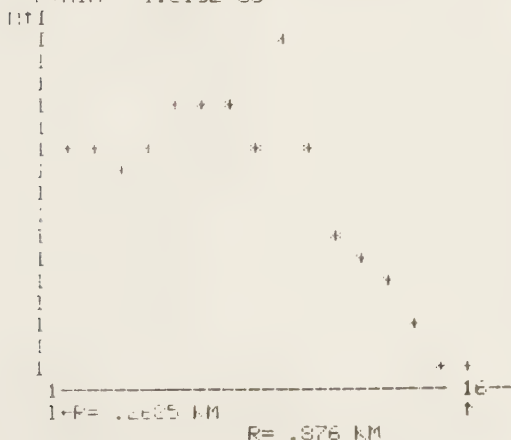
Tabelle 6: Computerausdruck der Meßwerte vom 18.6.1979
(zu Abbildung 31)

INFORMATIONSDATEN ZU DEN MESSWERTEN C7

DATUM : 18.6.79
 UHRZEIT : 15 UHR 50
 WINKEL : 10 GRAD
 MESSBEREICH : .2685 KM BIS .876 KM

ES WURDEN 16 MESSWERTE JEWEILS IM
 ABSTAND VON .04405 KM GESPEICHERT.
 (EIN MESSWERT IST JEWEILS MITTELUNG
 AUS 27 WERTEN.)

DIAGRAMM: $\ln(U/R) + R/R_K$ GEGEN R
 MINUS: $-1.549E-06$
 MAXI: $1.215E-06$



5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Meßkampagne

Abbildung 28 zeigt alle Ergebnisse, die während der 8-wöchigen Versuchsserie erzielt wurden. Die Meßergebnisse der Berechnung der Schrägsichtweite V'_s (2°) nach dem 2-Punkt-Verfahren und nach der Slope-Methode sind miteinander verglichen. Die Streuung der Meßwerte kann hervorgerufen sein durch Inhomogenitäten. Die Berechnung der Schrägsichtweite nach der Slope-Methode kann als sehr genau angesehen werden, weil sie einen großen Meßwertebereich umfaßt. Das 2-Punkt-Verfahren stützt sich nur auf 2 Meßwerte und ist daher, besonders bei großer Sichtweite über 5 km, mit einem weit größeren Fehler behaftet. In diesem Bereich sind Abweichungen der Methoden bis zu 100 % zu verzeichnen. Die Genauigkeitsgrenzen der Tabelle 1 sind in Abbildung 28 gestrichelt angegeben.

Die Ergebnisse der Meßkampagne bei überwiegend homogener Schichtung zeigen, daß das 2-Punkt-Verfahren gleiche Ergebnisse in den Fällen liefert, in denen auch die Slope-Methode anwendbar ist.

Ein Fall, bei dem die Slope-Methode keine Ergebnisse liefert, der Fall c in Abbildung 6, wird im nächsten Kapitel genauer behandelt.

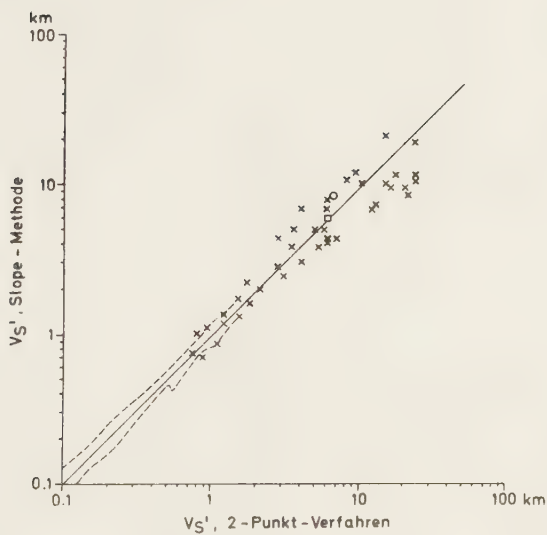


Abbildung 28: Ergebnisse der Meßkampagne
 Vergleich der Schrägsichtweiten V_S' (2^0), bestimmt mit
 der Slope-Methode und mit dem 2-Punkt-Verfahren.

5.3 Meßbeispiel bei Inversionslage

Abbildung 29 zeigt den vertikalen Verlauf der Meßwerte $\beta\tau^2$, gemessen am 3.5.1978. 4 nacheinander durchgeführte Meßreihen mit jeweils 10 Einzelmessungen sind aufgetragen. Man erkennt am vertikalen Verlauf der Werte $\beta\tau^2$, der Lidar Signatur, ein Ansteigen bis etwa 900 m Höhe und daraufhin einen Abfall zu kleineren Werten.

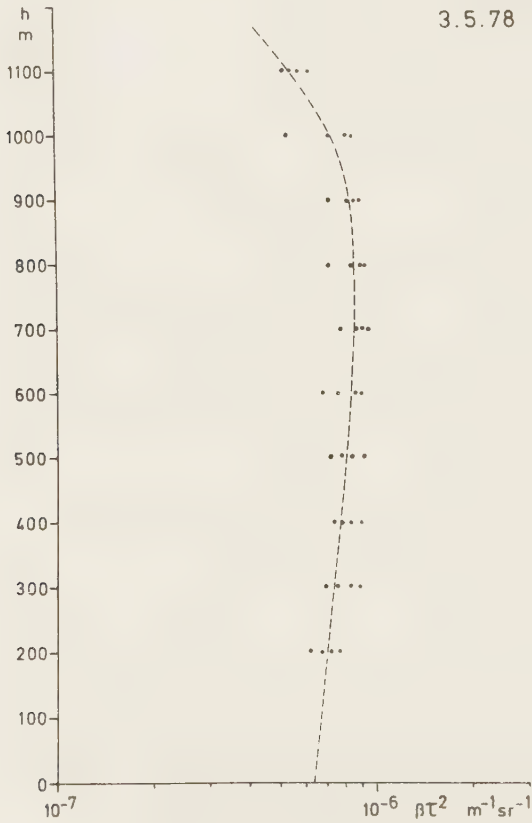


Abbildung 29: Vertikaler Verlauf der Lidar Signatur $\beta\tau^2$ vom 3.5.1978

Wie bereits vorher in Kapitel 2.4.2 ausgeführt, ist die Bestimmung der Schrägsichtweite nach der Slope-Methode nicht möglich. Dies ist also der Fall, wo die bisher bekannte Auswertung nicht zum Ziele führt. Er ist demnach besonders interessant zum Test des 2-Punkt-Verfahrens.

Vor einer experimentellen Prüfung ist es möglich, mit dem in Abbildung 29 gezeigten vertikalen Verlauf der Lidar Signatur eine Rechnung durchzuführen, um die theoretischen Signaturen in bestimmte Meßrichtungen zu berechnen, um daraus die Reichweiten für das 2-Punkte-Verfahren rechnerisch vorherzusagen. Nimmt man diese gemessene Verteilung als Grundlage einer Berechnung nach Kapitel 3.4, so erhält man unter den Meßwinkeln 10° , 20° , 30° , 60° und 90° berechnete Spannungskurven, wie sie in Abbildung 30 dargestellt sind. Die berechneten Signale β_T^2/R^2 sind gegen die Entfernung aufgetragen. Bei der für das System bestimmten Rauschgrenze von $2 \cdot 10^{-13}$ Einheiten ergeben sich die mit Pfeilen gekennzeichneten vorausberechneten Reichweiten $R_{B, \text{theor}}$.



Abbildung 30: Berechnete Signale β_T^2/R^2 aufgrund der gemessenen vertikalen Verteilung der Lidar Signatur der Abbildung 29 für verschiedene Meßwinkel

Abbildung 31 zeigt Einzelmessungen mit dem logarithmischen Verstärker unter den angegebenen Winkeln als Beispiele für die Messung der Reichweite. Das Oszillographenbild des Signalverlaufs bis 6 km Entfernung ist für die verschiedenen Meßwinkel übereinander dargestellt. Der erste Nulldurchgang - hier zu sehen als Kreuzungspunkt der Rauschsignale mit der gestrichelten, horizontalen Linie - ist bei 90° zwischen 1,2 und 1,8 km, bei 10°-Messung zwischen 1,8 km und 2,4 km. Die Reichweite ist unter 10° also fast doppelt so lang wie unter 90°. Eine genaue Auswertung wurde per Computer durchgeführt. Sie ergab die gemessenen Werte $RR_{\text{prakt.}}$.

3. 5.78

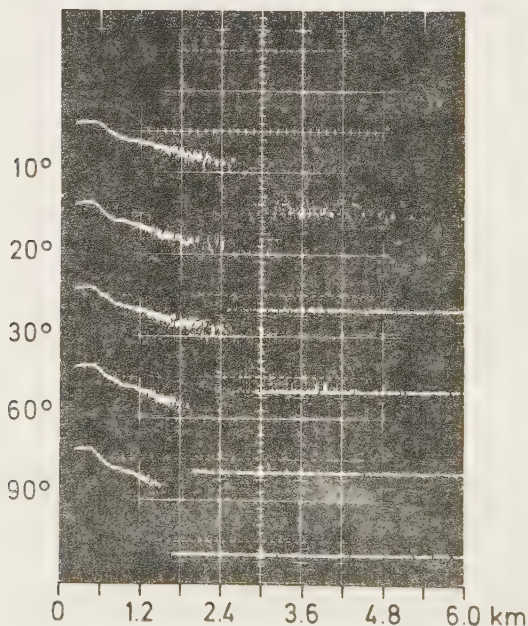


Abbildung 31: Fotos des Lidar Signalverlaufs vom Oszillographenschirm. Der logarithmische Verstärker wurde benutzt, der Meßwinkel ist als Parameter angegeben.

Ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Reichweiten RR ist in Tabelle 7 zu sehen.

Tabelle 7: Vergleich der Reichweiten bei der
Inversionslage am 3.5.1978

Meßwinkel	RR _{prakt.}	RR _{theor.}
10°	1900 m	1950 m
20°	2100 m	2100 m
30°	1850 m	1950 m
60°	1420 m	1450 m
90°	1370 m	1350 m

Die Übereinstimmung ist verblüffend. Es ist damit die Möglichkeit aufgezeigt, durch Messung unter verschiedenem Winkel die Inversionshöhe eindeutig zu bestimmen. Der Vergleich mit der berechneten Inversionslage der Abbildung 15 ist in Abbildung 32 dargestellt. Die bekannten Kurven sind durch Kurve 5 erweitert, die die Meßwerte vom 3.5.1978 darstellen. Man erkennt, daß die Inversionshöhe bei etwa 900 m liegt und der Verlauf dem des Modells nahe kommt.

Das 2-Punkt-Verfahren gibt die Möglichkeit, den in Kapitel 3.4 angegebenen Entscheidungsprozeß anzuwenden und die Inversionshöhe zu bestimmen. Daraufhin läßt sich mit einem Diagramm nach Abbildung 15 oder 32 die Sichtweite mit dem Wissen der Inversionsgrenzen bestimmen.

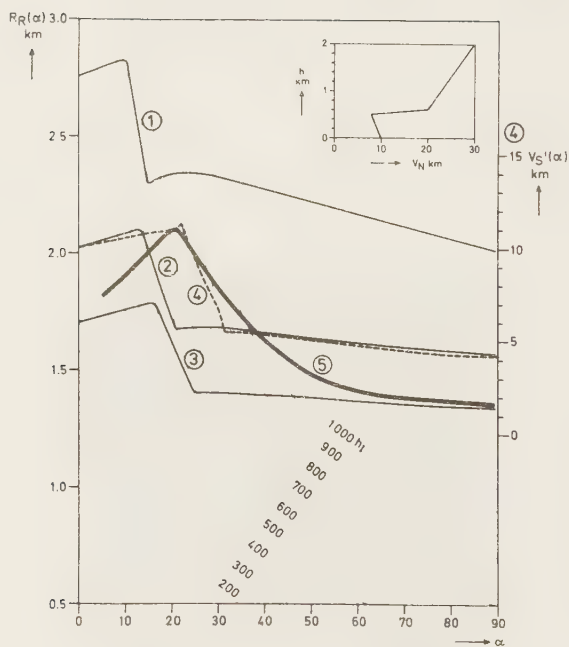


Abbildung 32: Berechnete Reichweite R_R in Abhängigkeit vom Meßwinkel für die rechts oben eingezeichnete vertikale Schichtung (wie Abbildung 15). Kurve 5: Meßwerte vom 3.5.1978

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Luftfahrt leidet regelmäßig und insbesondere im Herbst darunter, daß Nebel an den Flughäfen die Starts und Landungen erschwert oder unmöglich macht. In dieser Situation ist es besonders wichtig, die längs der Start- und Landewege herrschenden Sichtverhältnisse objektiv zu erfassen und die Tendenz zu ermitteln.

Für die Bestimmung der schrägen Normsicht könnte man im Prinzip Transmissometerstrecken auf dem Gleitpfad erstellen. Die dabei notwendig werdenden Türme im Anflugbereich stellen aber in jedem Falle Gefahrenquellen dar. Der Einsatz von Fernmeßgeräten läßt hier Abhilfe erwarten.

Bei dem Lidar Verfahren wird statt der Transmission die Rückstreuung des Lichts als Funktion der Zeit gemessen. Das zurückgestreute Licht enthält die Information über die Dichte der Aerosole entlang des Laserstrahls. Setzt man vereinfachend eine streckenweise homogene Atmosphäre voraus, was mit einer konstanten Rückstreuung auf den entsprechenden Strecken verbunden wäre, wird die Größe des Rückstreusignals durch das Produkt aus reziproker Entfernung im Quadrat und der Extinktion der Atmosphäre bestimmt. Wegen der bekannten Beziehung von Sichtweite und Extinktion kann die Sichtweite entlang des Laserstrahls durch exakte Analyse des Lidar Signals erhalten werden. Der Vorteil dieser Meßtechnik liegt darin, daß die Meßrichtung beliebig gewählt werden kann.

Die bisher genaueste Auswertemethode für das Rückstreusignal, die sogenannte Slope-Methode, erfordert einen großen elektronischen Aufwand für die Signalspeicherung und im Anschluß daran eine rechnerische Bestimmung der Entfernungsabhängigkeit der Dichte der streuenden Teilchen. Die praktische Einführung der Methode scheiterte bisher an den notwendigen Personal- und Gerätekosten. Ein weiteres Verfahren, welches die Kostenprobleme löst, ist nur mit einer zusätzlichen unabhängigen Sichtmessung eindeutig. Diese Methode, die Reichweitenmethode genannt wird, benutzt das Erreichen der Nachweisgrenze des Laserlichts als Kriterium. Die Entfernung, bei der die Nachweisgrenze erreicht wird, kann bei guter Sicht, also bei geringem Aerosolgehalt und damit bei geringer Rückstreuung, gleich der Reichweite des Signals bei Nebel

sein, wo in erster Linie die stärkere Extinktion das Signal bestimmt. Deshalb kann eine sichere Aussage nur durch eine weitere, unabhängige Messung der Sicht erfolgen.

Aufgabe dieser Arbeit war es, die Mehrdeutigkeit der Reichweitenmethode zu beheben und trotzdem praktikabel zu bleiben. Dazu wurde ein zweiter Stützpunkt des Lidar Signals benötigt. Dieser zusätzliche Meßwert mußte eine Aussage über die Größe der Rückstreuung in unmittelbarer Nähe des Empfängers erbringen. Der elektronische Aufwand der Speicherung eines Spannungswertes und dessen Verrechnung mit der Reichweite des Signals ist gering im Vergleich zur aufwendigen Slope-Methode. Der mögliche verbleibende Nachteil, daß Inhomogenitäten im Signalverlauf zwischen 1. und 2. Stützstelle zu Fehlinterpretationen führen konnten, wurde in der vorliegenden Arbeit durch die Messung unter einem weiteren Winkel ausgeschaltet. Ein Algorithmus für den praktischen Einsatz in Verbindung mit einem Laser-Wolkenhöhenmesser wurde angegeben.

Für die Messung der schrägen Normsichtweite wurde ein Lidar-Gerät entwickelt und im praktischen Einsatz erprobt. Das Gerät ist gekennzeichnet durch einen einfachen, wartungsfreundlichen und kompakten Aufbau und läßt einen automatischen Betrieb zu.

Die Ergebnisse einer Meßkampagne zeigen die nach der Fehlerbetrachtung zu erwartenden Ergebnisse. In den Fällen, in denen die Slope-Methode exakte Ergebnisse liefert, tut dies auch das 2-Punkt-Verfahren. Der dargestellte Prototyp ist geeignet, die schräge Normsicht direkt anzuzeigen.

Die neue Methode erlaubt es Laser Wolkenhöhenmesser, die als Laser ein GaAs-Laser-Dioden-Array verwenden, auch als Sichtweitenmesser einzusetzen. Es ist nur notwendig, die Laserleistung um den Faktor 10 bis 100 zu steigern, um zu einer kombinierten Verwendung auch als Schrägsichtmeßgerät zu kommen.

- | | | | |
|----|---|--------|--|
| 1 | AEG-Telefunken | | Measuring Device for Standard Visual Range.
AEG/FFM Scattered Light Recorder, Typ STR-V
22-56-MS04 |
| 2 | Allen, R.J.
Evans, W.E. | (1972) | Laser Radar (LIDAR) for Mapping
Aerosol Structure
Rev.Sci.Instrum. <u>43</u> (1972) 1422-1432 |
| 3 | Aufm Kampe, H.J. | (1950) | Visibility and Liquid Water Content in
Clouds in the free Atmosphere
Journ. of Meteorology <u>7</u> (1950) 54-57 |
| 4 | Bolle, H.J. | (1967) | Infrarotspektroskopie als Hilfsmittel
und Gegenstand meteorologischer und
planetarischer Forschung.
BMBW-Forschungsbericht W67-17 |
| 5 | Borchardt, H.
Rößler, J. | (1971) | Erfahrungen und Überlegungen mit Lidar
am Meteorologischen Observatorium Aachen
Bericht d. Dt. Wetterdienstes 125(16) 1971 |
| 6 | Brown, R.T. | (1967) | "A single-ended Laser Device for the Remote
Determination of Atmospheric Transmittance
over Horizontal and Slant Paths" IEEE Trans.
Aerosp. and Electron. Syst. Suppl. <u>6</u> , 276-286 |
| 7 | Brown, R.T. | (1973) | "A New Lidar for Meteorological Application"
J. Appl. Meteor., <u>12</u> , 698-708 |
| 8 | Carrier, L.W.
Cato, G.A.
v.Essen, K.J. | (1967) | The Backscattering and Extinction of
Visible and Infrared Radiation by Selected
Major Cloud Models.
Applied Optics <u>6</u> (1967) 1209-1216 |
| 9 | McClatchey, R.A.
Fenn, R.W.
Selby, J.E.A.
Volz, F.E. | (1970) | Optical Properties of the Atmosphere
AFCRL-70-0527
Environmental Research Papers No.331 (1970) |
| 10 | McClatchey, R.A.
Fenn, R.W.
Selby, J.E.A.
Volz, F.E.
Garing, J.S. | (1972) | Optical Properties of the Atmosphere
(Third Edition)
AFCRL-72-0497 (1972). |
| 11 | Cohen, A. | (1972) | Cloud-Base Water Content Measurement using
Laser Radar Data
Applied Optics <u>14</u> (1975) 2873-2877 |
| 12 | Cohen, A. | (1975) | "Horizontal Visibility and the Measurement
of Atmospheric Optical Depth of Lidar"
Appl. Opt. <u>14</u> , 2878-2882 |

- 13 Collis, R.T.H. (1970) "Visibility Measurement for Aircraft Landing Operations"
Vieze, W.
Uthe, E.E.
Oblanas, G.
Stanford Research Institute, Final Report,
Contract No. F 19 628-70-C-0083 for AFCRL.
- 14 Collis, R.T.H. (1976) "Lidar Measurement of Particles and Gases by
Russell, S.B. Elastic Backscattering and Differential
Absorption Topics"
Appl. Physics 14 (1976) 71-151
- 15 McCormick, M.P. (1968) "Mie Total and Differential Backscattering
Lawrence, J.F., Jr. Cross Sections at Laser Wavelengths for Junge
Crownfield, F.B., Jr. Aerosol Models"
Applied Optics 12 (1968) 2424-2425
- 16 Deirmendjian, D. (1958) "Temperature Dependency of the Rayleigh
Scattering Coefficient in the Atmosphere"
J.O.S.A. 48 (1958) 1018-1019
- 17 Derr, V.E. (1974) "A Theoretical Analysis of the Information
Post, M.J. Content of Lidar Atmospheric References"
Schwiesow, R.L. NOAA-Techn. Report ERL 296-WPL-29
Calfee, R.F.
Ncnice, G.T.
- 18 Dovgialla, E.N. (1973) "Verwendung der Methode der Rückstreuung
Kovalev, V.A. zur Messung der Durchlässigkeit der
Poljakova, E.A. Atmosphäre in schrägen Richtungen"
Meteorologija i Gidrologija 6 (1973) 56-61
- 19 Duntley, S.Q. (1948) "The Reduction of Apparent Contrast by the
Atmosphere"
J. Appl. Meteor. 38 179-191
- 20 FAA Report (1974) "Slant Range (SVR) Approach Light Contact
Height (ALCH) Measurement System: Evaluation
in Fog"
Final Report FAA No. FAA-RD-74-7
- 21 Finger, G. (1977) "Transmission der Atmosphäre im Infraroten"
Bericht der Gruppe Infrarot-Physik,
Labor für Festkörperphysik der ETH Zürich
August 1977
- 22 George, D.H. (1972) "Precision and Representativeness of
Ceilometer Cloud Height Measurements in
the Runway Approach Area"
Proceedings of the 5th Conf. on Aerospace
& Aeronautical Meteorology, May 22-26, 1972
Washington D.C.; pp. 259-264
American Meteorological Society, Boston

- 23 George, D.H. (1972) "A New Concept: Sensor Equivalent Visibility"
Lefkowitz, M. Conference Proceedings: International Conference on Aerospace and Aeronautic Meteorology, May 22-26, 1972, Washington D.C., pp. 243-250.
American Meteorological Society, Boston
- 24 Giese, R.H. (1974) "Grundlagenuntersuchungen zur Interpretation
Schwehm, G. extraterrestrischer Zodiakallichtmessungen
Zerull, R. und Lichtstreuung von Staubpartikeln verschiedener Formen"
BMFG-FWB 74-10
- 25 Graßl, H. (1970) "Determination of Cloud Drop Size Distribution
from Spectral Transmission Measurements"
Beitr. Phys. Atmosphäre 43 (1970) 255-284
- 26 Guzzi, R. (1972) "Evidence of Particulate Extinction in the
Tomasì, E. Near IR Spectrum of the Sun"
Vittorio, O. J.Atmos.Sci., 7 p.1974
- 27 Hänel, G. (1971) "New Results Concerning the Dependence of
Visibility on Relative Humidity and their
Significance in a Model for Visibility
Forecast"
Contr. Atm. Phys. 44 137-167
- 28 Hänel, G. (1972) "The Ratio of the Extinction Coefficient to
the Mass of Atmospheric Aerosol Particles
as a Function of the Relative Humidity"
J. Aerosol Sci. 3 pp.455-460
- 29 Hänel, G. (1976) "On the Interpretation of Atmospheric
Bullrich, K. Turbidity Measurements"
Journ. Atm. Sci. 33 194-197
- 30 Harris, F.S., Jr. (1972) "Calculated Mie Scattering Properties in
the Visible and Infrared of Measured
Los Angeles Aerosol Size Distributions"
Applied Optics 11 (1972) 2697-2705
- 31 Harris, F.S., Jr. (1974) "Visibility"
Chapter in Geoscience Instrumentation
Editor E.A.Wolff and E.P.Mercanti
Wiley 1974, 421-433
- 32 Herman, B.M. (1971) "Determination of Aerosol Size Distribution
Browning, S.R. from Lidar Measurements"
Reagan, J.A. J.Atmos.Sci. 28 (1971) 763-771
- 33 Herrmann, H. (1972) Das DFVLR-Lidar-System
Werner, Ch. DLR-Mitt. 72-26 (1972)

- | | | |
|----|--|--|
| 34 | Hidy, G.M.
Appel, B.R.
Charlson, R.J. (1975)
Clark, W.E.
Friedlander, S.K.
Hutchinson, D.H.
Smith, T.B.
Suder, J.
Weselowski, J.J.
Whitby, K.T. | "Summary of the California Aerosol
Characterization Experiment"
J.Air.Poll.Cont. U.S. 25 (1975) 1106-1114 |
| 35 | Hill, A.N. (1975) | "Development of Present Weather Observations
with Laser Techniques"
7th International Laser Radar Conference,
Menlo Park,
Private Communication, NOAA, Nat. Weather
Serv., Sterling, Virginia |
| 36 | Hochreiter, F.S. (1972) | "The Present and Future of Visibility Ob-
servations"
Conference proceedings: International Con-
ference on Aerospace and Aeronautic Meteorol-
ogy, May 22-26, 1972, Washington D.C.
pp. 230-242
American Meteorological Society, Boston |
| 37 | Höhn, D.H. (1975) | "Atmospheric Vision $0.35 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 14 \mu\text{m}$ "
Applied Optics <u>14</u> (1975) 404-412 |
| 38 | Junge, C.E. (1952) | "Gesetzmäßigkeiten der Größenverteilung
atmosphärischer Aerosole über dem Kontinent"
Ber. Dt. Wetterdienst U.S. Zone Nr. 35 |
| 39 | Kasten, F. (1967)
Neumann, D. | "Ein Verfahren zum Nachweis stratosphärischer
Aerosolpartikel durch Streuung von Laser-
Strahlung"
Beiträge zur Physik der Atm. <u>40</u> (1967) 70-94 |
| 40 | Katerle, H.J. (1970)
Schellhase, R.
Werner, Ch.
Helbig, H. | "Die DFVLR-Lidar Systeme I und II"
DLR-Mitt. 70-18 |
| 41 | Kent, G.S. (1978) | "Deduction of Aerosol Concentration from
1.06 μm Lidar Measurements
Applied Optics 17, 3763-3773) 1978 |
| 42 | Koschmieder, H. (1925) | "Theorie der horizontalen Sichtweite"
Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre
12 (1925) 33-55, 171-181 |

- 43 Kunz, G.J. (1978) "Relation between the Atmospheric Extinction Coefficient, Backscatter Coefficient and Visibility". A Literature Study. PHL 1978-24, Physisch Laboratorium Report, The Hague, Niederlande
- 44 Lang, M. (1969) "Untersuchungen über die Anwendungsmöglichkeiten eines Lasers für Schrägsichtmessungen" Abschlußbericht Fa. Eltro, TI3 (61-606-K-608) des BMVg (1969)
- 45 Laser Safety Rules (1973) "A Guide for Control of Laser Hazards" The American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- 46 De Luisi, J.J. (1976) "Results of a Comprehensive Atmospheric Aerosol-Radiation Experiment in the South-western United States"
Furekawz, P.M.
Gillette, D.A.
Schuster, B.G.
Charlson, R.J.
Porch, W.M.
Fegley, R.W.
Herman, B.M.
Rabinoff, R.A.
Twitty, J.T.
Weinmann, J.A.
Part I: Size Distribution, Extinction, Optical Depth and Vertical Profiles of Aerosols Suspended in the Atmosphere
J.Appl.Met. 15 (1976), 441-454
- 47 Mack, E.J. (1972) "Some Microphysical Features of Coastal and Inland Fogs"
Kocmond, W.C.
Pilie, R.J.
Katz, U.
Proc. of the 5th Conf. on Aerospace & Aeronaut. Meteorology, May 22-26, 1972, Washington D.C. American Meteorological Society, Boston
- 48 Pal, S.R. (1976) "Multiple Scattering in Atmospheric Clouds: Lidar Observations"
Carswell, A.I.
Appl. Opt. 15, 1990-1995
- 49 Parry, H.D. (1972) "The Role of Ground Based Remote Sensors in the Improvement of Local Weather Forecast" Second Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Preprints, American Met. Society, Boston, 1972
- 50 Penndorf, R. (1952) "Slant Visibility"
Goldverg, B.
Lufkin, D.
Air Force Surveys in Geophysics No. 21
- 51 Penndorf, R. (1957) "Tables of the Refractive Index for Standard Air and the Rayleigh Scattering Coefficient for the Spectral Region between 0.2 and 20 μ m and their Application for Atmospheric Optics" J.O.S.A., 47 (1957) 176-182
- 52 Quenzel, H. (1975) "Calculations about the systematic error of visibility meters measuring scattered light"
Ruppersberg, G.H.
Schellhase, R.
Atm. Environment 9 (1975) 587-69

- 53 Reis, S. (1978) "Konstruktion und Dimensionierung eines Systems nach dem Lidar Prinzip zur Messung von Entfernung und Wolkenhöhe"
Ing. Arbeit Fachhochschule München, FB VI, 1978
- 54 Rößler, J. (1972) "Verfahren zur optischen Sondierung der Troposphäre mit Lidar"
Dissertation Universität Mainz, 1972
- 55 Ruger, J.F. (1974) "Studie eines Schrägsichtmeßgeräts auf Laserbasis"
Abschlußbericht Fa. Eltro E/F 41 C/30202/36153 des BMVg
- 56 Ruppertsberg, G.H. (1971) "Atmosphärische Lichtdurchlässigkeit und Streuung im sichtbaren Spektralbereich und in den Fenstern des IR-Bereichs bis zu 5 m"
v.Redwitz, H. Schellhase, R. BMVg - FBWT 71-16 (1971)
- 57 Ruppertsberg, G.H. (1977) "Transmission der Atmosphäre"
Vortrag und Bericht im Lehrgang "Sicht und Sichtmessung" der Carl Cranz Gesellschaft, Heidelberg, 1977
- 58 Ruppertsberg, G.H. (1979) "The Slant Meteorological Visibility"
Schellhase, R. Optica Acta 26, 699-709, 1979
- 59 Schewe, G.J. (1975) "A Climatology of Inversions"
Dept. of Atm. Science, Colorado State Univ. Paper No. 238, Fort Collins, Colorado
- 60 Stahlenhof, A.H.C.(1974) "Slant Visibility during Fog Related to Wind Speed, Air Temperature and Stability"
Arch.Met.Geoph.Biokl. Ser.B. 22, 351-361, 1974
- 61 Tuomi, T.J. (1975) "The Effect of Relative Humidity on Lidar Backscatter and Extinction by the Atmospheric Aerosol"
Beitr. Phys. Atm. 48, pp. 159-167
- 62 Viezee, W. (1973) "Evaluation of the Lidar Technique of Determining Slant Range Visibility for Aircraft Landing Operations"
Oblanas, G. Collis, R.T.H. AFCRL-RT-73-0708, Final Report. Contract F. 19628-71-C-0152
- 63 Waggoner, A.P. (1972) "Measurement of Aerosol Total Scatter - Backscatter Ratio"
Ahluquist, N.C. Charlson, R.J. Appl. Optics 11 (1972) 2886-2882
- 64 Weiss, L. (1977) "Meteorologie und Sichtweite"
Vortrag und Bericht im Lehrgang "Sicht und Sichtmessung" der Carl Cranz Gesellschaft Heidelberg, 1977

- 65 Werner, Ch. (1970) "Ein Lidar System zur Messung der vertikalen
Helbig, H. Dunstverteilung in der Atmosphäre während des
Atlantischen Passat Experiments auf W.F.S
"Planet" I. Technischer Teil
"Meteor" Forschungsergebnisse, Reihe B,
5 (1970) 52-61
- 66 Werner, Ch. (1970) ibid, II. Meßergebnisse, Seite 62-84
- 67 Werner, Ch. (1972) "Lidar Measurements of Atmospheric Aerosol
as a Function of Relative Humidity"
Opto-Electronics, 4, pp. 125-132
- 68 Werner, Ch. (1973) "Grundlagen für ein Raman-Lidar-System"
DLR-Mitt. 73-19
- 69 Werner, Ch. (1974) "Determination of Multiple Scattering by
Means of Laser Radar Technique"
Abstract of the 6th ILRC, Tokyo,
Sept. 3-6, 1974
- 70 Werner, Ch. (1977) DFVLR Mobile Lidar System
Herrmann, H. Rev.Sci.Instrum. 48 (1977) 247-251
- 71 Werner, Ch. (1978) "Simultaneous Observations of the Tropospheric
Kent, G.S. Aerosol using Lidar and a Solar Radiometer"
Köpp, F. Proceedings, 4th Symposium on Meteorological
Observations and Instrumentation, Apr.10-14,1978
Denver, Published by American Met.Soc., Boston
- 72 Kent, G.S. (1979) "A Joint Lidar Solar Radiometer Experiment"
Köpp, F. J.Appl.Meteor. 18 (1979)
Werner, Ch.
- 73 Werner, Ch. (1978) "Rückstreuungseigenschaften der Aerosole in der
Kent, G.S. Atmosphäre"
BMVg-FBWT 78-2
- 74 Werner, Ch. (1978) "Airborne Lidar Aerosol Measurements during
Bachstein, F. the ASSESS II Mission"
Dietz, S. Rev.Sci.Instrum. 49 (1978) July
Herrmann, H.
Köpp, F.
Löffler, H.
- 75 Werner, Ch. (1979) "Fernmeßmethoden zur Bestimmung der Schräg-
sichtweite"
DFVLR-FB 79-14
- 76 Whitby, K.T. (1973) "On the Multi-modal Nature of Atmospheric
Aerosol Size Distributions"
Presented at the VIII International Conference
on Nucleation, Leningrad, USSR., Sept.28,1973

- 77 Wolff, E. (1979) "Ausrüstung eines tragbaren Lidar Systems mit Programmen und Messung der Normsichtweite"
Praktikumsbericht, Fachhochschule München, Juli 1979
- 78 Offenlegungsschrift (1976) "Einfaches Meßgerät der Schrägsichtweite"
Aktenzeichen: P 26 06 318.3 vom 7.10.1976
Anmelder: Impulsphysik GmbH, Hamburg

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. H. Walther für viele Anregungen und besonders für die geopfertete Freizeit, die er dieser Arbeit widmete.

Herrn Dr. G. H. Ruppertsberg und Herrn Dipl.-Phys. H. E. Hoffmann sei für viele Diskussionen und Anregungen zum Thema Sicht gedankt.

Für die Erstellung der Meßapparatur und die Durchführung von Versuchen sei den Studenten der Fachhochschule München, Fräulein S. Reis und Herrn Creutzmann, gedankt, die ihre Anteile an der Arbeit als Ingenieur- bzw. Praktikumsarbeiten einreichen konnten.

Lebenslauf

Name	Hans-Georg <u>Christian</u> Werner
Geburtstag	4. September 1939
Familienstand	verheiratet, 2 Söhne
Ausbildung	1945 - 1957 Grund- und Oberschule in der DDR, Abitur-Ost 1957 - 1958 Goethe-Gymnasium Berlin-Wilmersdorf, Abitur-West 1958 - 1961 Studium Physik, Universität Bonn, Vordiplom 1961 - 1966 Studium Physik, Universität München, Diplom 1966 - 1979 Wiss. Mitarbeiter am Institut für Physik der Atmosphäre der DFVLR 1980 Abteilungsleiter im Institut für Opto- elektronik der DFVLR

